

# ЗМІСТ

---

## Розділ 1. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

<i>Глушков А.В.</i> Анализ и прогноз антропогенного влияния на воздушный бассейн промышленного города на основе методов теории хаоса: математические основы.....	5
<i>Бунякова Ю.Я.</i> Загальна характеристика екологічного стану атмосфери по областях і промислових містах України.....	12

## Розділ 2. МЕНЕДЖМЕНТ ТА ЕКОНОМІКА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

<i>Губанова О.Р.</i> Використання методології стейкхолдер-менеджменту в забезпеченні сталого розвитку Тилігульського лиману.....	18
<i>Павленко О.П.</i> Економіко-екологічні основи комплексного морського планування.....	27
<i>Полянничко О.В.</i> Інституціональні підходи розвитку екологічного підприємництва в рекреаційно-туристичній сфері.....	32
<i>Полищук Т.Н.</i> Об основах организации производства вин высшей категории качества в Украине.....	39

## Розділ 3. МЕТЕОРОЛОГІЯ, КЛІМАТОЛОГІЯ ТА АГРОМЕТЕОРОЛОГІЯ

<i>Воскресенская Е.Н., Вышкваркова Е.В.</i> Экстремальные осадки и их климатические изменения на территории Украины по данным наблюдений.....	45
<i>Хохлов В.М., Єрмоленко Н.С.</i> Про зв'язок середнього річного стоку р.Південний Буг з посухами в період 1951-2010 рр.....	51
<i>Івус Г.П., Семенова І.Г., Ковальков І.А.</i> Роль гідродинамічної нестійкості атмосфери в процесах відсіченого циклогенезу влітку над Україною.....	60
<i>Івус Г.П., Хоменко Г.В., Зубкович С.О.</i> Використання фронтального параметра для визначення зон небезпечного вітру.....	67
<i>Сініцина В.В.</i> Моделювання росту колеоптилю зернових культур в період «посів-сходи».....	75
<i>Агайар Э.В.</i> Применение закона распределения Джонсона для выравнивания рядов скорости ветра у поверхности Земли.....	83

## Розділ 4. ГІДРОЛОГІЯ СУШІ ТА ГІДРОЕКОЛОГІЯ

<i>Бардан С.И., Сербов Н.Г.</i> Формирование бимодального сценария сукцессии автотрофных компонент планктона в Баренцевом и Черном морях и оценка роли температурного фактора.....	90
<i>Обухов Є.В., Корягіна О.С.</i> Оцінка внутрішньорічного розподілу температури поверхні води Каховського водосховища.....	115
<i>Лобода Н.С., Даус М.Є., Дичеренко Ю.Л.</i> Оцінка якості води річки Десна за комплексом гідрохімічних показників.....	124

<i>Гопченко Є.Д., Катинська І.В.</i> Норми річного стоку на території Закарпаття.....	....134
<i>Овчарук В.А., Траскова А.В.</i> Статистичні параметри часових рядів максимальних витрат води і шарів стоку весняного водопілля в басейні річки Дністер .....	....141

## **Розділ 5. ОКЕАНОЛОГІЯ ТА МОРСЬКЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

<i>Тучковенко Ю.С., Кушнір Д.В.</i> Моделирование ветровой циркуляции вод в Тилигульском лимане.....	....149
<i>Полубок Т.Н.</i> Характеристика источников и механизмов образования наносов в Керченском проливе.....	....159

## **Розділ 6. ФУНДАМЕНТАЛЬНІ НАУКИ**

<i>Кругляк Ю.А.</i> Начала спинтроники в концепции «снизу-вверх».....	....168
<i>Герасимов О.И.</i> Физика гранулированных материалов: состояние и перспективы исследований. Часть 1.....	....196
<i>Хецелус О.Ю.</i> Прогнозирование хаотических процессов в геофизических и экологических системах на основе концепции аттрактора и нейросетевого подхода.....	....205
<i>Ганин Э.В., Герасименко Г.И., Горличенко М.Г., Шевченко В.Ф., Васильева М.Г., Шевченко С.В.</i> Супрамолекулярные соединения краун-эфиров с 1Н-имидазол-4,5-дикарбонитрилом, 3-нитро-1,2,4-триазолом и 1Н-тетразолом.....	....211
<i>Лавриненко А.В., Лавриненко Ю.В.</i> Выбор граничных условий для построения моделей фотонно-кристаллических волноводов.....	....217
<i>Khetselius O.Yu., Svinarenko A.A.</i> Analysis of the fractal structures in wave processes .....	....222
<i>Препелица Г.П., Лобода А.В., Грушевский О.Н., Буюджи В.В.</i> К вопросу о применении аппарата нейросетевого моделирования и распознавания образов в задачах прикладной экологии и гидрометеорологии.....	....227

## **Розділ 7. ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ТА ТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ**

<i>Сытов В.Н., Вельмискин Д.И., Лавриненко Ю.В., Лимонов А.С., Перельгин Б.В., Пустовит Т.М.</i> Анализ системы получения и обработки результатов радиозондирования и обоснование путей ее развития.....	....232
<i>Лимонов О.С., Перелигин Б.В., Пустовит Т.М.</i> Оцінка можливості використання різних топографічних даних для створення цифрового рельєфу місцевості.....	....237

УДК 519.24.001.57

А.В.Глушков, д.ф.-м.н.

*Одесский государственный экологический университет*

## **АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА ВОЗДУШНЫЙ БАСЕЙН ПРОМЫШЛЕННОГО ГОРОДА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ХАОСА: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ**

*С целью развития теоретических основ общего аппарата анализа и прогноза влияния антропогенной нагрузки на состояние атмосферы промышленного города и разработки новой схемы моделирования свойств полей концентраций загрязняющих воздушный бассейн веществ на основе методов теории хаоса в статье выполнен анализ тестов на наличие хаоса в системе (воздушный бассейн промышленного города) и изложена усовершенствованная методика восстановления фазового пространства.*

**Ключевые слова:** *воздушный бассейн промышленного города, экологическое состояние, временные ряды концентраций, загрязняющие вещества, анализ и прогноз, методы теории хаоса*

**Введение.** Проблема анализа и прогноза влияния антропогенной нагрузки на состояние атмосферы промышленного города и разработка адекватных схем моделирования свойств полей концентраций загрязняющих воздушный бассейн веществ относится к числу наиболее важных и фундаментальных проблем современной прикладной экологии и урбоэкологии. Большая часть моделей, использующихся в настоящее время для оценки состояния (а так же, прогноза) уровня загрязнения атмосферы, является или детерминистическими моделями, или основана на простых статистических регрессиях. Успешность этих моделей, однако, ограничивается как их неспособностью описать нелинейные характеристики загрязняющих веществ, так и недостаточным пониманием вовлеченных физических и химических процессов. В современной теории прогнозов временной ряд изменения какой-либо динамической характеристики сложной системы рассматривается как реализация случайного процесса, когда случайность является результатом сложного движения с многими независимыми степенями свободы. Альтернативой случайности является хаос, который имеет место даже в очень простых детерминистических системах. Хотя использование методов теории хаоса устанавливает определенное фундаментальное ограничение на долгосрочный прогноз (см., напр., [1-4]), тем не менее, как было показано в целой серии работ (см., напр., [4-16]), данные методы могут быть использованы для кратко- или средне-срочного прогноза. В предыдущих наших работах было показано (см. [1-3]), что для временных изменений концентраций двуокиси азота ( $\text{NO}_2$ ) и сернистого ангидрида ( $\text{SO}_2$ ) на двух постах Гданьского региона имеет место низкоразмерный хаос, что позволяет применить для них метод нелинейного прогноза. Такая методология с успехом использовалась при анализе многих гидрометеорологических характеристик (см., напр., [11,14,17,18]).

Целью нашей работы является изложение и развитие теоретических основ общего аппарата анализа и прогноза влияния антропогенной нагрузки на состояние атмосферы промышленного города и разработка новой количественной схемы моделирования свойств полей концентраций загрязняющих воздушный бассейн веществ на основе методов теории хаоса. Общий анализ и прогноз включают в себя исследование временных рядов концентраций загрязняющих веществ, восстановление спектра размерностей Ляпунова и на его основе расчет размерности Калана-Йорка, энтропии Колмогорова и да-

лее разработку усовершенствованной методики построения модели краткосрочного прогноза экологического состояния атмосферы промышленного города. В данной статье выполнен анализ тестов на наличие хаоса в системе (воздушный бассейн промышленного города) и изложена усовершенствованная методика восстановления фазового пространства.

**Общая методика анализа хаотических систем: Тест на наличие хаоса в системе.** Отметим сразу, что методика работы с хаотическим временным рядом может быть сведена к нескольким процедурам: идентификация хаотического режима, реконструкция фазового пространства, классификация временных рядов, построение модели прогноза. С целью выявления наличия хаоса в системе с шумом обычно рекомендуется использовать тест, введенный Готтвотом и Мелбенем [6]. Он имеет преимущества перед традиционными методами идентификации хаоса, которые будут описаны ниже. Во-первых, этот тест применяется непосредственно к данным временного ряда и не требует восстановления фазового пространства. Более того, несущественна и природа динамической системы, лежащей в основе временного ряда. Во-вторых, это бинарный тест, дающий, в принципе, 0 или 1, т.е. вполне однозначный результат. Рассмотрим дискретный временной ряд (скажем, концентраций загрязняющих воздушный бассейн города веществ)  $s(n)$  с  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Выберем вещественную константу  $c$  (на практике выбирается некое количество значений  $c$ ). Для каждого значения  $c$ , определим для всех  $n$

$$p(n) = \sum_{j=1}^n s(j) \cos(jc). \quad (1)$$

Далее, определим среднеквадратический сдвиг

$$M(n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [p(j+n) - p(j)]^2. \quad (2)$$

Если динамика системы является регулярной (периодической или квазипериодической), то с вероятностью единица  $M(n)$  является ограниченной функцией от  $n$ . Однако если динамика хаотична (в довольно нежестком смысле), то с вероятностью единица  $M(n) = V(n) + O(1)$  для некоторых  $V > 0$  [6]. Далее можно определить скорость асимптотического роста среднеквадратического сдвига с помощью выражения

$$K = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log M(n)}{\log n}. \quad (3)$$

Тогда,  $K = 0$  является признаком регулярной динамики, а  $K = 1$  – хаотической. Далее, предположим, что тестируется временной ряд с конечным числом данных  $s(n)$ ,  $1 \leq n \leq N$ . Определим

$$M(n) = \frac{1}{N-n} \sum_{j=1}^{N-n} [p(j+n) - p(j)]^2. \quad (4)$$

Если  $n \ll N$ , то вполне допустимо, что отношение  $M(n)$  к  $n$  будет аналогичным указанному выше. Чтобы предотвратить логарифмирование отрицательных значений, можно использовать соотношение  $\log(M(n) + 1)$  к  $\log n$  для  $1 \leq n \leq N_1$  с некоторым выбранным  $N_1$ ,  $1 \ll N_1 \ll N$ . На практике достаточно выбрать  $N_1 = N/10$ . Тогда, значение  $K$ , близкое к 0, определяет регулярную динамику, а близкое к 1 – хаотическую. В прин-



ципе рекомендуется выбрать случайным образом некоторое количество (100) значений констант  $c$  и для каждой рассчитать значение  $K$ , а в качестве конечного результата взять медиану всех рассчитанных  $K$ .

**Общая методика анализа хаотических систем: Восстановление фазового пространства.** Если динамическая система является нелинейной, применение преобразования Фурье не даст, скорее всего, какого-либо удовлетворительного результата, как в случае линейной системы. Связано это с тем, что процессы, приводящие к хаотическому режиму, являются фундаментально многомерными. Поэтому необходимо восстанавливать фазовое пространство системы, как можно лучше используя информацию, содержащуюся в векторе значений динамической характеристики, скажем,  $s(n)$ . Этот процесс реконструкции приведет к некоему набору  $d$ -мерных векторов  $y(n)$ , которые заменят наблюдаемые скалярные данные, и заключается в сочетании динамических концепций о нелинейных системах, как о генераторах информации, и геометрических представлений о том, как обнаружить аттрактор при помощи координат, определенных на основе их информационно-теоретического содержания. В работе Пакарда и др. [7] представлены соображения об использовании координат с временной задержкой для реконструкции фазового пространства наблюдаемой динамической системы и, как следствие, производной по времени от  $s$ . В действительности нет необходимости иметь производные, чтобы сформировать систему координат, в которой захвачена структура орбит в фазовом пространстве, а можно напрямую использовать запаздывающие переменные  $s(n + \tau)$ , где  $\tau$  – некоторое целое число, которое нужно определить. Используя совокупность временных задержек для создания вектора в  $d$ -мерном пространстве

$$y(n) = [s(n), s(n + \tau), s(n + 2\tau), \dots, s(n + (d-1)\tau)], \quad (5)$$

можно получить требуемые координаты. В нелинейной системе  $s(n + j\tau)$  – некоторая (неизвестная) нелинейная совокупность реальных физических переменных. Отметим, что такой метод вполне удовлетворительно работает даже в классической задаче об аттракторе Лоренца.

Рассмотрим далее вопрос о выборе временной задержки, используя теорему вложения Мане-Тейкенса [10,11]. Положение о том, что в принципе, допустима любая временная задержка, не всегда применимо в конкретном случае. Если  $\tau$  слишком мало, то координаты  $s(n + j\tau)$  и  $s(n + (j+1)\tau)$  будут так близки друг к другу, что их нельзя будет различить одна от другой. Если  $\tau$  слишком велико, то  $s(n + j\tau)$  и  $s(n + (j+1)\tau)$  будут полностью независимы друг от друга в статистическом смысле и проекция орбит на аттрактор будут направлены по двум совершенно несвязанным направлениям. Поэтому необходимо выбрать некое промежуточное положение между двумя упомянутыми случаями. Первым подходом для выбора  $\tau$  может быть расчет линейной автокорреляционной функции

$$C_L(\delta) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N [s(m + \delta) - \bar{s}][s(m) - \bar{s}]}{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N [s(m) - \bar{s}]^2}, \quad (6)$$

где

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N s(m),$$

и нахождение временной задержки, на которой  $C_L(\delta)$  первый раз переходит через некое значение, что дает вполне допустимое, в принципе, значение  $\tau$ , при котором  $s(n + j\tau)$  и  $s(n + (j+1)\tau)$  линейно независимы. Однако линейная независимость двух переменных не означает, что эти переменные независимы нелинейно, так как нелинейная взаимосвязь между ними может быть больше линейной. Поэтому предпочтительнее применять подход, в котором используется нелинейное понятие независимости, а именно, среднюю взаимную информацию. Коротко, концепцию взаимной информации можно описать следующим образом. Пусть имеется две системы  $A$  и  $B$  с результатами измерений  $a_i$  и  $b_k$ . Количество битов, которое можно узнать об измерениях  $a_i$  по измерениям  $b_k$ , задается параметрами теории информации [12], как

$$I_{AB}(a_i, b_k) = \log_2 \left( \frac{P_{AB}(a_i, b_k)}{P_A(a_i)P_B(b_k)} \right), \quad (7)$$

где  $P_{AB}(a_i, b_k)$  общая плотность распределения вероятности, а  $P_A(a_i)$  и  $P_B(b_k)$  – предельные плотности распределения вероятности для систем  $A$  и  $B$ , соответственно. Взаимная информация является неотрицательной, симметричной и равна нулю только тогда, когда системы независимы. Средняя взаимная информация между измерениями любых значений  $a_i$  системы  $A$  и  $b_k$  системы  $B$  – это средняя величина по всем возможным измерениям от  $I_{AB}(a_i, b_k)$ , т.е.

$$I_{AB}(\tau) = \sum_{a_i, b_k} P_{AB}(a_i, b_k) I_{AB}(a_i, b_k). \quad (8)$$

Чтобы применить последнее определение в контексте некоей физической системы, заменим систему  $A$  измерениями  $s(n)$ , а систему  $B$  – измерениями через некоторую временную задержку  $s(n + \tau)$ . Тогда среднее количество информации о  $s(n + \tau)$ , которое имеется во время измерений  $s(n)$ , будет

$$I(\tau) = \sum_{n=1}^N P(s(n), s(n + \tau)) \log_2 \left( \frac{P(s(n), s(n + \tau))}{P(s(n))P(s(n + \tau))} \right). \quad (9)$$

Теперь, как и в случае с автокорреляционной функцией, нужно определить ту величину  $I(\tau)$ , которая бы подходила для выбора временной задержки  $\tau$ . Если  $\tau$  слишком мало, измерения  $s(n)$  и  $s(n + \tau)$  содержат так много информации друг о друге, что нет необходимости делать оба измерения. Если  $\tau$  велико, то  $I(\tau)$  будет стремиться к нулю, и ничто не будет связывать  $s(n)$  и  $s(n + \tau)$ , а это также не является лучшим выбором. Фрейзер и Суинни [13] рекомендовали (и показали на примерах) использовать в качестве  $\tau$  значение, при котором  $I(\tau)$  достигает своего первого локального минимума.

Далее рассмотрим вопрос выбора размерности вложения. Целью определения размерности вложения является восстановление настолько большого Евклидова пространства  $R^d$ , чтобы весь ряд точек размерности  $d_A$  мог быть развернут без какой-либо неопределенности. Согласно положениям теоремы вложения, важно иметь такую размерность  $d_E$ , чтобы она была больше  $d_A$ , тогда как выбор  $d_E < d_A$  неприемлем в любом случае. Другими словами, не нужно искать размерность  $d_A$ , а можно взять какую-то заведомо большую размерность  $d_E$ . Например, в случае низкоразмерного хаоса можно априори задать размерность вложения 10 или даже 15, что вполне приемлемо с математической точки зрения. Однако при этом возникают две проблемы. Во-первых, большинство данных требуют перебора вариантов при компьютерных расчетах в пространстве  $R^d$ , и машинное время экспоненциально возрастает в зависимости от размерности вложения. Во-вторых, в присутствии шума или других высокочастотных компонентов

во временных рядах, в «дополнительные» размерности, не обусловленные динамикой системы, попадают исключительно высокочастотные составляющие сигнала. Ясно, что необходимо отыскать именно размерность  $d_A$ .

Естественно, в настоящее время имеется несколько методик, позволяющих восстановить размерность аттрактора. По нашему мнению [1], наиболее эффективными следует считать две. Первая методика, называемая методом корреляционной размерности, является одной из наиболее широко используемых при исследовании наличия хаоса во временных рядах. Этот метод использует корреляционный интеграл функции  $C(r)$  для того, чтобы найти различия между хаотическими и стохастическими системами. Для расчета корреляционного интеграла наиболее часто используется алгоритм Грасбергера-Прокаччия [15], в соответствии с которым

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{\substack{i,j \\ (1 \leq i < j \leq N)}} H(r - \|y_i - y_j\|), \quad (10)$$

где  $H$  – ступенчатая функция Хевисайда,  $H(u) = 1$  для  $u > 0$  и  $H(u) = 0$  для  $u \leq 0$ ;  
 $r$  – радиус сферы с центром в  $y_i$  или  $y_j$ ;  
 $N$  – длина временного ряда.

Если временной ряд характеризуется аттрактором, то корреляционный интеграл  $C(r)$  соотносится с радиусом  $r$  посредством выражения

$$d_2 = \lim_{\substack{r \rightarrow 0 \\ N \rightarrow \infty}} \frac{\log C(r)}{\log r}, \quad (11)$$

где  $d_2$  – корреляционная размерность, которую можно определить как наклон линии в координатах  $\log C(r)$  и  $\log r$  посредством среднеквадратического подбора прямой линии в некотором диапазоне  $r$ , называемом диапазоном масштабирования. Если корреляционная размерность достигает насыщения на некотором значении размерности вложения, то динамика системы в целом рассматривается как хаотическая. Значение корреляционной размерности, при котором она достигает насыщения, определяется как корреляционная размерность аттрактора ( $d_A$ ). Ближайшее целое число большее, чем  $d_2$ , дает оптимальную (необходимую) размерность вложения  $d_E$  для реконструкции фазового пространства или количество переменных, необходимых для моделирования динамики системы. С другой стороны, если корреляционная размерность неограниченно увеличивается с ростом размерности вложения, динамика системы рассматривается как стохастическая. Хотя изложенный метод корреляционной размерности является достаточно эффективным, тем не менее, вполне возможны ситуации (см., напр., [1-3, 15]), когда его применение приводит к не совсем корректным результатам. Поэтому для получения надежных результатов метод корреляционной размерности следует совместить, напр., с алгоритмом ложных ближайших соседних точек. Этот алгоритм также позволяет определить размерность вложения для реконструкции фазового пространства, а также проверить результаты, полученные по методу корреляционной размерности. Его суть заключается в поиске ответа на ключевой вопрос теоремы вложения: когда будет исключено ложное пересечение орбиты самой себя вследствие проецирования аттрактора в пространство слишком низкой размерности. Другими словами, нужно определить, когда точки в размерности  $d$  являются ближайшими соседями самих себя. Если исследовать эту проблему в размерности  $d = 1$ , затем –  $d = 2$  и т.д., пока не останется ложных ближайших соседних точек, то можно установить, основываясь только на геометрическом рассмотрении аттрактора, значение необходимой размерности вложения  $d_E = d_N$ . В размерности  $d$  каждый вектор

$$\mathbf{y}(k) = [s(k), s(k + \tau), s(k + 2\tau), \dots, s(k + (d-1)\tau)] \quad (12)$$

имеет ближайший соседний вектор  $\mathbf{y}^{NN}(k)$ . Евклидово расстояние в размерности  $d$  между векторами  $\mathbf{y}(k)$  и  $\mathbf{y}^{NN}(k)$  назовем  $R_d(k)$

$$R_d^2(k) = [s(k) - s^{NN}(k)]^2 + [s(k + \tau) - s^{NN}(k + \tau)]^2 + \dots + [s(k + \tau(d-1)) - s^{NN}(k + \tau(d-1))]^2. \quad (13)$$

По-видимому,  $R_d(k)$  мало для случая большого количества данных  $N$  и имеет порядок  $1/N^{1/d}$ . В размерности  $d + 1$  это расстояние изменяется вследствие  $(d + 1)$ -х координат  $s(k + d\tau)$  и  $s^{NN}(k + d\tau)$ , а выражение для него имеет вид

$$R_{d+1}^2(k) = R_d^2(k) + [s(k + d\tau) - s^{NN}(k + d\tau)]^2. \quad (14)$$

Переходя от размерности  $d$  к размерности  $d + 1$ , можно определить некую пороговую величину  $R_T$ , до которой соседние точки являются ложными. Тогда, если

$$\frac{|s(k + d\tau) - s^{NN}(k + d\tau)|}{R_d(k)} > R_T, \quad (15)$$

ближайшие соседние точки в момент времени  $k$  являются ложными. Как было показано Кеннелом и др. [16], для значений  $R_T$  в диапазоне  $10 \leq R_T \leq 50$  число ложных соседних точек, определяемых этим критерием, постоянно. На практике определяется процентное содержание ложных ближайших соседних точек, и в качестве  $d_N$  берется то значение, при котором это процентное содержание почти равно нулю.

**Выводы.** В данной статье, преследуя цель развития теоретических основ усовершенствованного общего аппарата анализа и прогноза влияния антропогенной нагрузки на состояние атмосферы промышленного города, и разработку новой схемы моделирования свойств полей концентраций загрязняющих воздушный бассейн веществ на основе методов теории хаоса, мы изложили наиболее эффективные методики тестирования наличия хаоса в динамической системе (применительно к воздушному бассейну промышленного города) и восстановления фазового пространства системы. Эти аспекты являются ключевыми для последующего рассмотрения задач классификации временных рядов загрязняющих веществ в атмосфере промышленного города и построения моделей кратко-и средне-срочного прогноза влияния антропогенной нагрузки на экологическое состояние системы.

### Список литературы

1. Бунякова Ю.Я, Глушков А.В. Анализ и прогноз влияния антропогенных факторов на воздушный бассейн промышленного города.- Одесса: Экология, 2010.-256с.
2. Глушков А.В., Хохлов В.Н., Сербов Н.Г, Бунякова Ю.Я, Балан А.К., Баланюк Е.П. Низко-размерный хаос во временных рядах концентраций загрязняющих веществ в атмосфере и гидросфере// Вестник Одесского гос. экологического ун-та.-2007.-N4.-С.337-348.
3. Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Prepelitsa G.P., Tsenenko I.A. Temporal variability of the atmosphere ozone content: Effect of North-Atlantic oscillation// Optics of atmosphere and ocean.-2004.-Vol.14.-P.219-223.
4. Sivakumar B. Chaos theory in geophysics: past, present and future // Chaos, Solitons & Fractals.-2004.-Vol.19.-P.441-462.
5. Chelani A.B. Predicting chaotic time series of PM10 concentration using artificial neural net-

- work // Int. J. Environ. Stud.-2005.-Vol.62.-P.181-191.
6. *Gottwald G.A., Melbourne I.* A new test for chaos in deterministic systems// Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. Mathemat. Phys. Sci.- 2004.-Vol.460.-P.603-611.
  7. *Packard N.H., Crutchfield J.P., Farmer J.D., Shaw R.S.* Geometry from a time series// Phys. Rev. Lett. -1980.-Vol.45.-P.712-716.
  8. *Sauer T., Yorke J., Casdagli M.* Embedology// J. Stat. Phys.-1991.-Vol.65.-P.579-616.
  9. *Abarbanel H.D.I., Brown R., Sidorowich J.J., Tsimring L.Sh.* The analysis of observed chaotic data in physical systems // Rev. Mod. Phys.-1993.-Vol.65.- P.1331-1392.
  10. *Mañé R.* On the dimensions of the compact invariant sets of certain non-linear maps// Dynamical systems and turbulence, Warwick 1980. Lecture Notes in Mathematics No. 898 / D.A. Rand, L.S. Young (Eds.). – Berlin: Springer, 1981.-P.230-242.
  11. *Takens F.* Detecting strange attractors in turbulence // Dynamical systems and turbulence, Warwick 1980. Lecture Notes in Mathematics No. 898 / D.A. Rand, L.S. Young (Eds.). – Berlin: Springer, 1981.-P.366-381.
  12. *Gallager R.G.* Information theory and reliable communication.- NY: Wiley, 1968.- 608p.
  13. *Fraser A.M., Swinney H.* Independent coordinates for strange attractors from mutual information// Phys. Rev. A.-1986.-Vol.33.-P.1134-1140.
  14. *Schreiber T.* Interdisciplinary application of nonlinear time series methods // Physics Rep.-1999.-Vol.308.-P.1-64.
  15. *Grassberger P., Procaccia I.* Measuring the strangeness of strange attractors// Physica D. – 1983.-Vol.9.-P.189-208.
  16. *Kennel M., Brown R., Abarbanel H.* Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction// Phys. Rev. A.-1992.-Vol.45.-P.3403-3411.
  17. *Glushkov A.V., Loboda N.S., Khokhlov V.N.* Using meteorological data for reconstruction of annual runoff series over an ungauged area: Empirical orthogonal functions approach to Moldova-Southwest Ukraine region//Atmospheric Research (Elsevier).-2005.-Vol.77.-P.100-113.
  18. *Glushkov A.V., Loboda N.S., Khokhlov V.N., Lovett L.* Using non-decimated wavelet decomposition to analyze time variations of North Atlantic Oscillation, eddy kinetic energy, and Ukrainian precipitation // Journal of Hydrology (Elsevier).-2006.-Vol.322.-P.14-24.

**Аналіз і прогноз антропогенного впливу на повітряний басейн промислового міста на основі методів теорії хаосу: Математичні основи. Глушков О.В.**

*З метою розвитку теоретичних основ загального апарату аналізу та прогнозу впливу антропогенного навантаження на стан атмосфери промислового міста і розробки нової схеми моделювання властивостей полів концентрацій забруднюючих повітряний басейн речовин на основі методів теорії хаосу, виконано аналіз тестів на наявність хаосу в системі (повітряний басейн промислового міста) і викладено удосконалену методику відновлення фазового простору.*

**Ключові слова:** *повітряний басейн промислового міста, екологічний стан, часові ряди концентрацій, забруднюючі речовини, аналіз і прогноз, методи теорії хаосу*

**Analysis and forecast of anthropogenic impact on air basin of industrial city on basis of a chaos theory methods: Mathematical foundations. Glushkov A.V.**

*In order to develop the theoretical foundations of the total approach to analysis and prediction of the influence of anthropogenic impact on the atmosphere of the industrial city and development of a new scheme of modelling the properties of fields of the polluting substances concentrations in the air basin by means of a chaos theory methods we present an analysis of the most effective tests on the presence of chaos in the system (air basin of industrial city) and improved method for reconstruction of the phase space.*

**Keywords:** *air basin of the industrial city, the ecological state of the, time series of concentrations, pollutants, analysis and prediction methods of the theory of chaos*

**Ю.Я. Бунякова, ас.**

*Одесский государственный экологический университет*

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ АТМОСФЕРИ ПО ОБЛАСТЯХ І ПРОМИСЛОВИХ МІСТАХ УКРАЇНИ**

*Надано загальну характеристику екологічного стану атмосфери по областях і промислових містах України та проведено аналіз ступеню забруднення повітряного басейну промислових міст шкідливими речовинами, який свідчать про загострення проблеми його санітарної охорони.*

**Ключові слова:** екологічний стан атмосфери, промислові міста України, шкідливі речовини

**Вступ.** Основний негативний вплив на екологічний стан атмосфери чинить антропогенна діяльність, яка найбільшою мірою розвинена в промислових містах, де проживає значна кількість населення й зосереджена велика кількість промислових підприємств та транспорту. Незалежно від типу і масштабів діяльності виробництва, промисловість в будь-якому разі більшою чи меншою мірою ступені але ж впливає на стан повітряного басейну [1-16]. Одним з основних напрямків екологічної політики України [1-4] є охорона атмосферного повітря, від якісного стану якого суттєво залежить стан здоров'я людини і, зрештою, всі аспекти соціально-економічного розвитку держави. Саме тому значна увага в рамках державної екологічної політики приділяється дослідженню, оцінці та прогнозуванню антропогенного впливу на повітряний басейн. Для забезпечення екологічної безпеки, створення сприятливого середовища життєдіяльності, запобігання шкідливому впливу атмосферного повітря на здоров'я людей та навколишнє природне середовище здійснюється регулювання викидів найбільш поширених і небезпечних забруднюючих речовин, перелік яких встановлюється Кабінетом Міністрів України. В даній роботі надано загальна характеристика екологічного стану атмосфери по областях та промислових містах України.

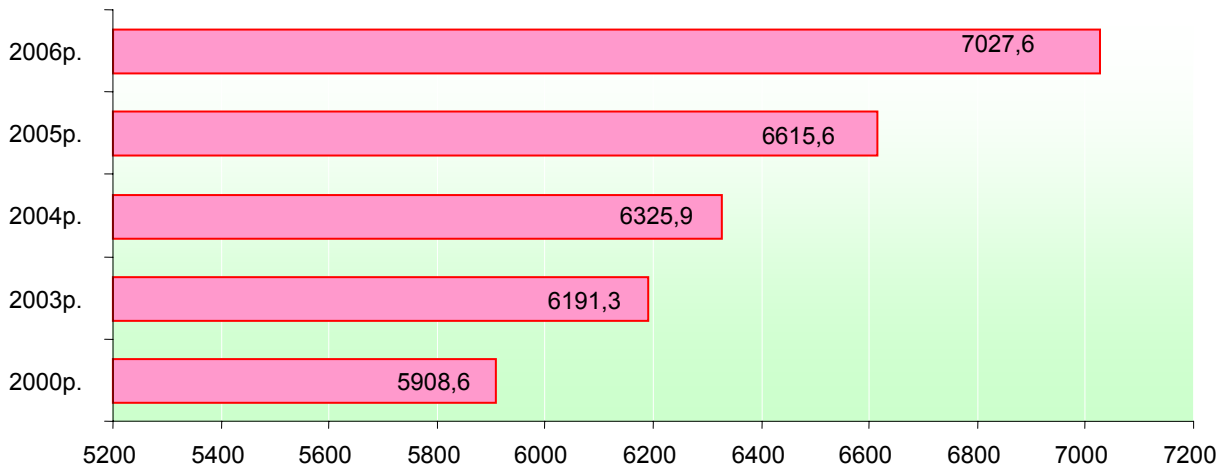
**Загальний стан атмосфери промислових міст України.** Перелік забруднюючих речовин переглядається Кабінетом Міністрів України не менше одного разу на п'ять років [1]. За даними державної статистичної звітності 2009 року, основними джерелами забруднення атмосферного повітря є підприємства переробної і добувної промисловості та підприємства електро- і теплоенергетики (відповідно 31 %, 21 % та 40 % від загального обсягу викидів забруднюючих речовин, що надходять в атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення). Викиди забруднюючих речовин джерелами, що пересуваються, становлять 39 % від загальної кількості викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Викиди забруднюючих речовин автомобільним транспортом становлять 91% від забруднюючих речовин, що викидаються пересувними джерелами [2]. До забруднюючих речовин, що переважно викидаються в атмосферне повітря, відносяться діоксид азоту ( $\text{NO}_2$ ), оксид вуглецю ( $\text{CO}$ ), діоксид сірки ( $\text{SO}_2$ ) та інші її сполуки, пил. Збільшується кількість випадків перевищення встановлених нормативів гранично допустимих викидів забруднюючих речовин стаціонарними джерелами. Основними причинами, що зумовлюють незадовільний стан якості атмосферного повітря в населених пунктах, є недотримання підприємствами режиму експлуатації пилосагоочисного обладнання, невживання заходів із зниження обсягу викидів забруднюючих речовин до встановлених нормативів, низькі темпи впровадження новітніх технологій та значне збільшення кількості транспортних засобів, зокрема тих, що вичерпали строк придатності. Упродовж останніх років у промислово розвинутих містах в атмосферному повітрі постійно реєструвалася наявність до 16 поліциклічних ароматичних вуглеводнів, з яких 8 є канцерогенами, груп нітрозамінів (нітрозодиметилам і нітрозодіетиламін) та важких металів (хром, нікель, кадмій, свинець, берилій). При цьому

в обсягах забруднення хімічними канцерогенами найбільшу питому вагу мають сполуки класу поліциклічних ароматичних вуглеводнів. Загалом канцерогенний ризик у 2009 році досяг 6,4–13,7 випадків онкологічних захворювань на 1 тисячу осіб, що значно перевищує міжнародні показники ризику [2-4]. На території України зберігається високий ризик виникнення надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру. В Україні функціонують 23767 потенційно небезпечних підприємств та інших об'єктів, аварії на кожному з яких можуть призвести до виникнення надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівня. Щороку реєструється до 300 надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру, внаслідок яких гинуть люди, завдаються великі економічні збитки [2]. Основними причинами виникнення техногенних аварій і катастроф та посилення негативного впливу внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру в Україні є: застарілість основних фондів, зокрема природоохоронного призначення, великий обсяг транспортування, зберігання і використання небезпечних речовин, аварійний стан значної частини мереж комунального господарства, недостатня інвестиційна підтримка процесу впровадження новітніх ресурсозберігаючих і екологічно чистих технологій в екологічно небезпечних галузях промисловості, насамперед, в металургійній, хімічній, нафтохімічній та енергетичній, природоохоронні проблеми, пов'язані з істотними змінами стану геологічного та гідрогеологічного середовища та зумовлені закриттям нерентабельних гірничодобувних підприємств, шахт і розрізів, небажання суб'єктів господарювання вживати заходів із запобігання аваріям та катастрофам на об'єктах підвищеної небезпеки та потенційно небезпечних об'єктах тощо. Найбільші в Україні викиди оксидів азоту, діоксиду сірки і пилу спостерігалися на підприємствах паливно-енергетичного комплексу – відповідно 58 %, 75 %, 56 %, вуглеводнів і летючих органічних сполук – на підприємствах добувної промисловості (78 %), оксиду вуглецю – на підприємствах переробної промисловості (72 %). Викиди пилу в цілому у всіх галузях економіки скоротилися майже на 7 %, діоксиду сірки – на 5%, оксидів азоту – на 4%, оксиду вуглецю – на 0,5%, у той же час, викиди вуглеводнів і летючих органічних сполук зросли на 0,9 %. У таблиці 1 представлена частка внеску від загального викиду в атмосферне повітря основних забруднюючих речовин від стаціонарних джерел в Україні по основних галузях економіки [3]. Протягом 2000-2006 років спостерігалось збільшення обсягів викидів забруднюючих речовин в повітряний басейн від стаціонарних та пересувних джерел забруднення.

Таблиця 1 - Показники антропогенного навантаження по основних галузях економіки

Галузь економіки	Частка від загального викиду, %			
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	Пил
Переробна промисловість	16,3	30,3	71,9	28,9
Паливно-енергетичний комплекс	74,6	58,2	5,4	55,6
Добувна промисловість	6,2	4,3	18,5	11,3
Сільське господарство, полювання й пов'язані з ним послуги	0,2	0,3	0,3	0,4
Будівництво	0,4	0,4	0,4	0,8
Інші галузі	2,3	6,5	3,5	3,0
Усі галузі економіки	100,0	100,0	100,0	100,0

Динаміка викидів шкідливих домішок в атмосферне повітря представлена на рис.1. У 2006 році викиди в атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення становили 4822,2 тис.т, що на 358,1 тис.т більше, ніж у 2005 році. Значне зростання спостерігалось у Київській (48,4 %), Полтавській (36,1 %), Херсонській (34,5 %), Івано-Франківській (31,9 %), Тернопільській (31,1 %), Вінницькій (26,1 %), Волинській (20,8 %), Житомирській (16,4 %), Львівській (15,4 %), Харківській (14,9 %), Хмельницькій (11,9 %) областях.



Обсяг викидів, тис. т.

Рис. 1 - Динаміка викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних та пересувних джерел забруднення, 2000–2006 рр., тис. тонн.

Проти 2005 року збільшились викиди в атмосферне повітря забруднюючих речовин від стаціонарних джерел у багатьох містах країни, зокрема, в Бердичеві (77,3 %), Старокостянтиніві (66,7 %), Херсоні (42,4 %), Україніці (40,2 %), Зеленодольську (38,5 %), Бурштині (35,1 %). Зменшились викиди на: в Києві - 21,4 %, Ялті – 38,5 %, Шостці – 40,0 %, Дмитрові – 43,3 %, Олександрії – на 46,6 % [3]. Обсяги викидів забруднюючих речовин від пересувних джерел автомобільного, залізничного, авіаційного та водного транспорту збільшились на 2,5 %, в основному за рахунок використання автотранспорту індивідуальних власників та залізничного транспорту. Слід зазначити, що в умовах переходу до ринкової економіки необхідність постійного збільшення автотранспортних перевезень зумовила зростання до 50–70 % внеску відпрацьованих газів у забруднення атмосферного повітря великих міст України, а відтак – і збільшення ризику для здоров'я населення. Автотранспорт виступає головним джерелом забруднення атмосферного повітря в Україні. Про це свідчить загальна тенденція до збільшення викидів в повітряний басейн шкідливих речовин. Так, у порівнянні із 1995 роком їх кількість зростає на 300,5 тис. т. На рис. 2 представлена динаміка викидів забруднюючих речовин в повітряний басейн від автотранспорту. Обсяги викидів оксидів азоту від роботи автотранспорту у 2006 році по країні становили 141,3 тис. т, що на 3,8 % більше ніж у 2005 році; оксиду вуглецю – 1657,7 тис. т, що на 2 % більше відповідно. Загальний обсяг викидів легких органічних сполук в атмосферу від залізничного, авіаційного та водного транспорту становив 7271,2 т, що на 34,2 % перевищує показник 2005 року.



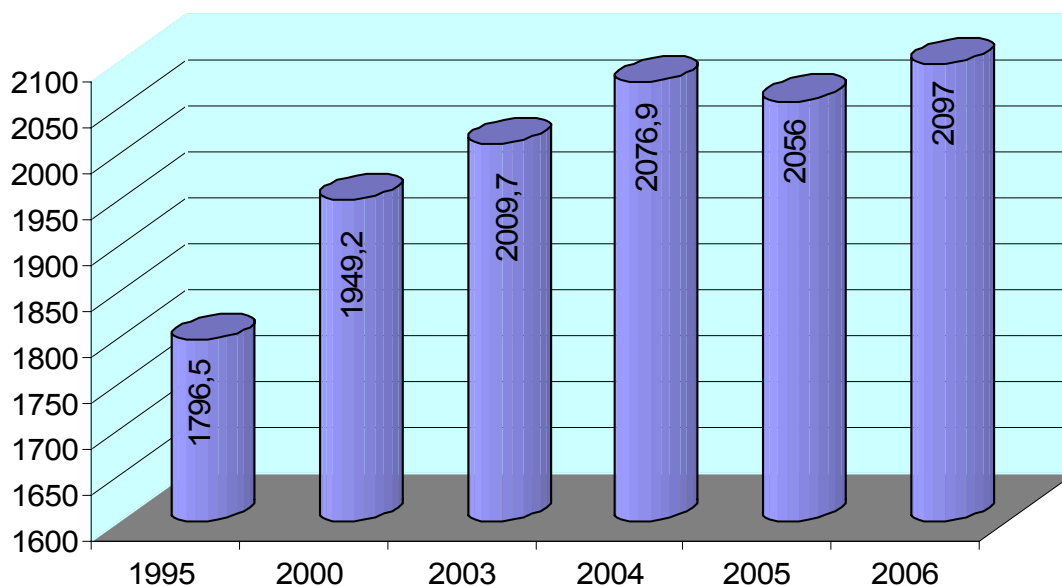


Рис. – 2. Динаміка викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря від автотранспорту, 1995–2006 рр., тис. т

Викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря від стаціонарних та пересувних джерел, зокрема автотранспорту, у розрахунку на одну особу по Україні у 2006 році становили 147,9 кг, що на 9,5 кг більше порівняно з 2005 роком. Як відомо, рівень забруднення атмосфери зазвичай описується набором статистичних характеристик для ряду вимірюваних шкідливих речовин. Щоб оцінити ступінь забруднення атмосфери, середні й максимальні концентрації речовин нормуються на величину середньої (максимальної) концентрації для великого регіону або на санітарно-гігієнічний норматив, наприклад на ГДК [7,10]. Нормовані характеристики забруднення атмосфери називають індексом забруднення атмосфери (ІЗА). У різних країнах запропоновано й використовується в практичній роботі велике число різних ІЗА [11–15]. Вміст в атмосфері шкідливих речовин представляється зазвичай набором статистичних характеристик або ІЗА окремо для кожного з інгредієнтів. Тому є необхідність одержання деякого узагальнюючого показника, який би враховував забруднення повітря декількома речовинами й характеризував би ступінь забруднення цими речовинами.

Як впливає із роботи [10], у міру збільшення перевищення ГДК шкідливі впливи різних речовин зростають із різною швидкістю, яка залежить від класу небезпеки речовини. Ця швидкість може бути визначена за значенням відношення ГДК для атмосферного повітря населених місць до ГДК для виробничих приміщень. Значення відношень різних речовин різні й змінюються від одиниць до декількох тисяч. Середні значення цих відношень визначені для чотирьох класів небезпеки шкідливих речовин. Тому, знаючи ці відношення, можна привести рівні забруднення атмосфери різними речовинами до рівня забруднення однією якою-небудь речовиною [7,10].

Приведення рівнів забруднення повітря різними речовинами до забруднення діоксидом сірки здійснюється за допомогою показника степені  $c_i$  в індексі забруднення, використовуваному в Україні, де  $c_i$  є безрозмірна константа, що дозволяє привести ступінь забруднення  $i$ -ою речовиною до степені забруднення двоокисом сірки, прийнятим за основний [7]. Для приведення ступеня забруднення всіх речовин до забруднення речовиною третього класу небезпеки (до  $\text{SO}_2$ ) використовується формула комплексного ІЗА, що враховує  $n$  речовин. Комплексний ІЗА показує, якому рівню забруднення атмо-

сфери (в одиницях ГДК SO<sub>2</sub>) відповідає фактично спостережуваний вміст домішок у міському повітрі, тобто у скільки раз сумарний рівень забруднення повітря перевищує припустиме значення. Для того, щоб значення, визначені для різних міст можна було порівнювати, необхідно розраховувати їх для однакової кількості речовин. Комплексний ІЗА є дуже зручним показником для визначення районів міста з найбільшим рівнем забруднення й визначення забруднюючих речовин, які вносять найбільший вклад у рівень забруднення атмосферного повітря міста. При цьому необхідно пам'ятати, що комплексний ІЗА є показником забруднення атмосфери сумою речовин. При порівнянні комплексних ІЗА необхідно використовувати їх з однаковою кількістю домішок.

**Висновки.** Зроблений аналіз та характеристика екологічного стану по областях та промислових містах України свідчить про досить небезпечний екологічний стан. У 22 містах України рівень забруднення повітря (за комплексним індексом забруднення атмосфери – КІЗА) був вищий за середній рівень по країні. Найбільш високий рівень забруднення зафіксовано в містах Одесі, Дніпродзержинську, Красноперекіпську, Армянську, Горлівці, Слов'янську, Держинську, Макіївці, Маріуполі, Єнакієвому, Лисичанську, Запоріжжі, Донецьку, Дніпропетровську, Краматорську, Луцьку, Ужгороді, Сіверськодонецьку, Черкасах, Кривому Розі, Рубіжному, Ялті, що пов'язано зі значними концентраціями формальдегіду, діоксиду азоту, бенз (а)пірену. У деяких містах був високий середній вміст фтористого водню, фенолу, пилу та інших речовин. Високий рівень забруднення атмосферного повітря формується, головним чином, за рахунок викидів шкідливих речовин підприємствами коксохімічної, металургійної та хімічної промисловості. Головними причинами, що зумовлюють незадовільний, а найчастіше і небезпечний стан атмосферного повітря населених пунктів, є недотримання підприємствами технологічного режиму експлуатації пилогазоочисного устаткування, невиконання у встановлені терміни заходів щодо зниження обсягів викидів до нормативного рівня; низькі темпи впровадження сучасних технологій очищення викидів; відсутність ефективного очищення викидів підприємств від газоподібних домішок; відсутність санітарно-захисних зон між промисловими та житловими районами. Надмірна концентрація промислових об'єктів та автотранспорту на території України призвела до надзвичайного антропогенного навантаження на довкілля. Тому, незважаючи на тенденцію до зниження обсягів промислових викидів в атмосферне повітря останніх років, проблема його санітарної охорони не тільки втратила своєї актуальності, але й набуває зростаючої гостроти.

### Список літератури

1. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16 жовтня 1992 р. №2707-ХІІ (редакція зі станом на 18.11.2012 – zakon.rada.gov.ua).
2. Закон України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 року» від 21 грудня 2011 р. №2818-VI// Відомості Верховної Ради України.-2011.-№26.-ст.218.
3. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні (1996–2006 рр.)//Інтернет- ресурс: [www.menr.gov.ua](http://www.menr.gov.ua).
4. Екологічний паспорт регіонів України// Інтернет-ресурс: [www.menr.gov.ua](http://www.menr.gov.ua).
5. Звіт Міністерства екології і природних ресурсів в Одеській області (1996-2011 рр.)// Інтернет- ресурс: [www.menr.gov.ua](http://www.menr.gov.ua).

6. *Регіональна програма охорони довкілля, раціонального використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки // Затверджена сесією Одеської обласної ради від 17.11.2000.–№ 238.–XXIII (Наук. кер.: проф. Топчієв О.Г.).-2000.-С.40.*
7. *Безуглая Э.Ю.* Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах. – Л.: Гидрометеиздат, 1986.–200с.
8. *Бунякова Ю.Я., Глушков А.В.* Анализ и прогноз влияния антропогенных факторов на воздушный бассейн промышленного города.- Одесса: Экология, 2010.-256с.
9. *Примак А. В.* Идентификация внешних условий функционирования объектов в автоматизированных системах управления интенсивностью загрязнения воздушного бассейна// В кн.: Проблемы контроля и защиты атмосферы от загрязнения.- Киев: Наукова думка.-1983.-Т9.-С.39-46.
10. *Пинигин М.А.* Научные основы санитарной охраны атмосферного воздуха//В кн.: Санитарная охрана атмосферного воздуха городов.-М.: Медицина.-1976.-С.15–47.
11. *Inhaber H.* A set of suggested air quality indices for Canada// Atmos. Envir.-1975.-Vol.9.-P.353–364.
12. *Ott W.R., Thom G.A.* Critical review of air pollution index systems in the United States and Canada//J. Air Pollut. Contr. Assoc.-1976.-Vol.26.-P.460–470.
13. *Сонькин Л.Р.* Некоторые возможности прогноза содержания примесей в городском воздухе// Труды ГГО.- 1971.-Вып.254.-С.121-122.
14. *Guideline for Public Reporting of a Daily Air Quality – Pollutant Standards Index (PSI) N2-074.* US EPA Office of Air Quality and Standards, Research Triangle Park.-2008.-P.26.
15. *Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Loboda N.S., Bunyakova Yu.Ya.* Short-range forecast of atmospheric pollutants using non-linear prediction method// Atmospheric Environment (Elsevier; The Netherlands).-2008.-Vol.42.-P. 7284-7292.
16. *Глушков А.В., Серга Э. Н., Бунякова Ю.Я.* Хаос во временных рядах концентраций загрязняющих веществ в атмосфере (г. Одесса) // Вісник Одеського держ. екологічного ун-ту.-2009.-N8.-С.233-238.

**Общая характеристика экологического состояния атмосферы по областям и промышленным городам Украины. Бунякова Ю.Я.**

*Представлены общая характеристика экологического состояния атмосферы по областям и промышленным городам Украины и краткий анализ степени загрязнения воздушного бассейна промышленных городов вредными веществами, который свидетельствует об обострении проблемы его санитарной охраны.*

**Ключевые слова:** экологическое состояние атмосферы, промышленные города Украины, вредные вещества

**General characteristics of the ecological state of the atmosphere for industrial areas and cities of Ukraine  
Bunyakova Yu.Ya.**

*There are presented a general characteristic of the ecological state of the atmosphere in the industrial areas and cities of Ukraine and a brief analysis of the degree of air pollution in industrial cities of the harmful substances that indicate a worsening of the problems of its sanitary protection.*

**Keywords:** ecological state of the atmosphere, the industrial cities of Ukraine, harmful substances

УДК 504.03

О.Р. Губанова, д.е.н.

Одеський державний екологічний університет

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ СТЕЙКХОЛДЕР-МЕНЕДЖМЕНТУ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТИЛІГУЛЬСЬКОГО ЛИМАНУ

*Визначено фактори порушення сталості екосистеми Тилігульського лиману та обґрунтовано вплив розбіжності інтересів стейкхолдерів на посилення еколого-економічних суперечностей територіального розвитку. Проведено позиціонування асоційованих суб'єктів за значущістю для забезпечення сталого розвитку мікрорегіону. Запропонована стратегія управління стейкхолдерами зони Тилігульського лиману.*

**Ключові слова:** сталий розвиток, зона Тилігульського лиману, стейкхолдери, стратегія управління зацікавленими сторонами.

**Вступ.** Протягом останніх десятиріч парадигмою людського існування обрано концепцію сталого розвитку, пріоритетність якої, перш за все, зумовлена необхідністю дотримання справедливого розподілу суспільних благ сьогодні та врахування перспектив майбутніх поколінь, зміщення акцентів у бік розширення прав і свобод людини за умови коеволуції з навколишнім світом, узгодження векторів розвитку соціуму та природного середовища.

Реалізація принципів сталого розвитку потребує особливого ставлення до людини як центральної фігури в процесі будь-якого розвитку та головної рушійної сили соціально-економічного прогресу. Проте, щоб вийти на шлях стійкого розвитку, людям потрібно об'єднувати свої знання і ресурси, погоджувати різні погляди. Жодна окремо взята людина, організація або навіть цілий сегмент глобального суспільства не в змозі сам по собі знайти і реалізувати такий спосіб розвитку, що відповідав би масштабу викликів, з якими сьогодні стикається людство. Таким чином, необхідність взаємодії для вирішення проблем, зокрема, з охорони довкілля, актуальна як для кожної окремої людини, так і для суспільства в цілому.

Однією з найгостріших екологічних проблем Причорноморського регіону України є погіршення стану екосистеми Тилігульського лиману, який вважається унікальним природним комплексом, що поєднує різноманітні ландшафти (акваторію, цілинний степ, заливні луки, солончакові ділянки та очеретяні марші) та, згідно Рамсарської конвенції, включений до переліку водно-болотних угідь, які мають міжнародне значення, головним чином, як середовище існування водоплавних птахів [1]. На думку фахівців, відновлення і раціональне використання природних ресурсів Тилігульського лиману можливо лише в кооперації з усіма, хто використовує ці ресурси (земле- і водокористувачами, відпочивальниками, дачниками, рибалками, місцевим населенням тощо), при дотриманні балансу між можливостями екосистеми і потребами соціально-економічного розвитку території [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні основи сталого розвитку суспільства у своїх працях ґрунтовно досліджували як вітчизняні, так і зарубіжні вчені, зокрема, Н.Е. Daly, Р.В. Kates, J.H. Hulse, Б.В. Буркинський, З.В. Герасимчук, Б.М. Данилишин, С.І. Дорогунцов, Б.А. Карпінський, Л.Г. Мельник, С.К. Харічков, Є.В. Хлобистов, В.Я. Шевчук, Л.Б. Шостак та ін.

Висвітленню проблемних питань стратегічного управління через теорію зацікавлених сторін (стейкхолдерів) присвячені роботи R.E. Freeman, T. Donaldson, L.E. Preston, M.A. Петрова, К.І. Радченко, А.І. Александрова тощо. На даний час сформовані концептуальні підходи до класифікації зацікавлених сторін, їх сегментації та аналізу стратегій взаємодії. Проте, актуальним залишається методологічне завдання щодо ув'язки наявного інструментарію управління балансом інтересів стейкхолдерів із задачами, що впливають з проблематики сталого розвитку регіональних соціо-еколого-економічних систем.

**Мета роботи** полягає в обґрунтуванні доцільності застосування методологічних засад стейкхолдер-менеджменту щодо реалізації стратегії сталого еколого-економічного розвитку Тилігульського лиману.

**Матеріали і методи дослідження.** Методологічною основою дослідження є теоретичні положення економічної науки, праці в галузі економіки природокористування і охорони довкілля, інструменти теорії зацікавлених сторін, системний підхід.

**Результати дослідження та їх аналіз.** Тилігульський лиман розташований на території двох південних областей України. За територіально-адміністративною підпорядкованістю його північна частина відноситься до Березівського, західна – до Комінтернівського району Одеської області, а східна – до Березанського району Миколаївської області. Загальна площа цих адміністративних районів становить приблизно 5 тис. км<sup>2</sup>, на якій проживає майже 130 тис. чол. [3, 4]. Найважливіші показники, що характеризують соціально-економічний розвиток мезорегіону Тилігульського лиману, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 - Основні показники соціально-економічного стану адміністративних районів зони Тилігульського лиману.\*

Показник	Район		
	Комінтернівський	Березівський	Березанський
Площа, тис. км <sup>2</sup>	1,49	1,64	1,38
Кількість населених пунктів	66	65	50
Населення, тис. осіб	69,4	34,4	24,0
міське	14,3	12,5	4,1
сільське	55,1	21,9	19,9
Густота населення, осіб/км <sup>2</sup>	46,6	21,0	17,4
Демографічні показники, на 1000 осіб:			
кількість народжених	13,3	13,2	12,3
кількість померлих	14,6	18,2	15,1
природний приріст	-1,3	-5,0	-2,8
Середня заробітна плата, грн.	1773	1313	1708
Рівень безробіття, %	0,5	2,2	3,5
Площа с/г угідь, тис. км <sup>2</sup>	1,141	1,364	1,127
Посівна площа, тис. км <sup>2</sup>	0,819	0,955	0,567
Валовий збір зерна, тис. т	124,7	165,3	92,1
Врожайність зернових, ц/га	24,8	26,6	22,6
Поголів'я с/г тварин, тис. гол.:			
корови	3,3	3,1	5,3
свині	7,3	9,6	5,9
вівці, кози	4,0	2,2	3,7
птиця	783,2	173,5	109,8
Виробництво с/г продукції:			
м'яса, т	6771	3534	2061
молока, тис. т	13,4	27,6	21,6
яєць, тис. шт.	183186	15474	7538
Рентабельність с/г виробництва, %	1,9	15,3	28,2

\* - за станом на 2011 рік.

Порівняння показників соціально-економічного стану адміністративних районів, які формують мезосередовище Тилігульського лиману, вказує на те, що найбільш розвинутим серед них є Комінтернівський район, на території якого знаходяться Одеський припортовий завод та морський торговельний порт «Южний». Взагалі на розвиток мезорегіону впливає низка чинників, а саме:

- недостатня енергоефективність та високий рівень енергозатрат галузей економіки;
- значний ступінь зносу основних засобів та їх моральна застарілість;
- велика енерго- та ресурсоемність основних виробничих фондів, що знижує конкурентоспроможність продукції місцевих виробників;
- нестача власних коштів у підприємств для здійснення інвестування;

- залежність підприємств від кон'юнктури зовнішніх ринків;
- обмежений доступ та висока вартість кредитних ресурсів;
- недостатнє ресурсне забезпечення агропромислового комплексу;
- низький рівень впровадження сучасних агротехнологій у сільському господарстві;
- дисбаланс між попитом та пропозиціями на ринку праці, наявність тіньової зайнятості;
- вкрай низька якість доріг і застарілий стан транспортної та енергетичної інфраструктури;
- кризовий стан житлово-комунального господарства та необхідність проведення реформування галузі;
- нераціональне використання земельних ресурсів та неефективне використання земель сільськогосподарського призначення.

Проте вплив мезосередовища на ситуацію в зоні Тилігульського лиману опосередкований. Стан екосистеми лиману, перш за все, пов'язаний з розвитком мікрорегіону, до складу якого входять населені пункти, дачні масиви, курортно-рекреаційні об'єкти та території природно-заповідного фонду, а галузева структура представлена сільським господарством, рекреацією і транспортом.

На західному березі Тилігульського лиману розташовані населені пункти: Кошари, Любополь, Пшенианове, Кордон, Мар'янівка, Червона нива, Широке, Калинівка, Каїри, Волкове, Донська балка, Косівка, Степанівка, Гуляївка, Софіївка, Златоустове, на східному - Прогресівка, Ташине, Анатолівка, Червона Українка та курортна зона «Коблево».

Чисельність населення, яке постійно мешкає в зоні Тилігульського лиману, становить приблизно 10 тис. осіб. Кількість рекреантів, які одночасно можуть відпочивати у більш ніж 100 пансіонатах та базах відпочинку, що відносяться до курорту «Коблево», становить майже 17 тис. осіб [5]. Крім того, починаючи з 90-х років минулого століття, поблизу сіл Каїри, Калинівка, Пшенианове та Любополь почали створюватися великі дачні масиви, що натепер нараховують близько 37 тис. дач, якими щосезону користується від 50 до 115 тис. осіб [6].

У 1995 році 4755,3 га акваторії лиману і 3440,1 га прилеглої території Березанського району Миколаївській області одержали статус регіонального ландшафтного парку, до якого увійшли землі Ташинського, Краснопільського, Анатолівського, Червоноукраїнського та Коблевського сілрад. В 1997 році аналогічний статус було надано територіям, що розташовані на західному березі Тилігульського лиману і відносяться до Комінтернівського та Березівського районів Одещини. Площа регіонального ландшафтного парку, який знаходиться в Одеській області, становить 13954 га, з них 9981 га – акваторія лиману. Загальна площа Тилігульського регіонального ландшафтного парку (ТРЛП), до якого входить 5 заказників («Коса стрілка», «Калинівський», «Тилігульський пересип», «Новомиколаївський», «Каїровський»), становить 22149,4 га.

Через акваторію Тилігульського лиману проходять 3 магістральні трубопроводи, це - аміакопровід Тольяті — Горлівка — Одеса (потужністю 340 т аміаку/годину), газопровід Шебелинка – Одеса і нафтопровід Херсон – Снігірівка – Одеса пропускною спроможністю 9,2 млрд. м<sup>3</sup> газу та 19 млн. т нафти на рік відповідно [7].

Сільськогосподарська спеціалізація мікросередовища Тилігульського лиману впливає на ступень розораності земель, яка досягає 70-75%. Земельні ресурси використовуються для вирощування зернових, овочевих, баштанних та технічних культур, садівництва, виноградарства, птахівництва та тваринництва. Проявом антропогенного впливу сільськогосподарської діяльності на екосистему Тилігульського лиману є змив в нього хімічних препаратів, внаслідок їх застосування в рослинництві, та потрапляння в акваторію відходів тваринництва, що суттєво погіршує гідрохімічний стан лиману. Деякі показники природокористування в зоні лиману наведені в табл. 2.

Поряд з кліматичними та іншими природними ресурсами, потужним фактором розвитку рекреаційного комплексу мікрорегіону Тилігульського лиману є наявність лікувальних грязей, запаси яких, за оцінками фахівців, становлять 14 млн. т. Використання їх потенціалу дозволить щорічно проходити грязелікування більш ніж 100 тисячам рекреантів та одержувати соціально-економічний ефект в розмірі до 2 млн. дол. США. Крім того, додатковою статтею доходу (понад 10 млн. дол. США на рік) може стати переробка грязей та ропи на заводі, будівництво якого в зоні лиману, з урахуванням витрат на природоохоронні заходи, оцінюється в 1,5 млн. дол. США, а термін окупності інвестицій – в 1,5 роки [8].

Таблиця 2 - Показники природокористування в зоні Тилігульського лиману

Показник	Характеристика
Чисельність населення, тис. осіб:	
постійні мешканці	10
дачники	50 - 115
Площа ТРЛП, га:	
акваторія	14736,3
земля	7413,1
Кількість артезіанських свердловин, од.	609
Площа, га:	
рекреаційні території	713
об'єкти ПЗФ	19303
водно-болотні угіддя	26000
курортні та лікувально-оздоровчі території	10
Водоспоживання, тис. м <sup>3</sup> /рік	9551*
Утворення твердих побутових відходів, т/рік	16526*

\*- розрахункові дані

На даний час в межах мікрорегіону Тилігульського лиману існує три типи територій: заповідні, рекреаційні та господарського призначення. Враховуючи особливості ландшафту, потребу в збереженні біорізноманіття, а також інтереси мешканців сіл та інших природокористувачів, функціональне зонування земель, прилеглих до лиману, залишається мозаїчним, тобто території природно-заповідного фонду перемежуються з рекреаційними зонами та землями, на яких здійснюється господарська діяльність, що призводить до виникнення проблем природоохоронного характеру (розораність ділянок заповідних територій, утворення нелегальних ставків та водоймищ, неконтрольований випас тварин, підпали очерету, поява несанкціонованих сміттєзвалищ тощо). Отже, одним з факторів порушення сталості екосистеми Тилігульського лиману та погіршення якості його водних ресурсів є неупорядкована структура землекористування.

Функціонування соціо-еколого-економічної системи Тилігульського лиману здійснюється у відповідності до Конституції України, низки міжнародних конвенцій (Рамсарської конвенції про водно-болотні угіддя, Конвенції про біорізноманіття, Картагенського протоколу про біобезпеку, Бернської конвенції про охорону дикої флори і фауни та природних середовищ існування в Європі), Водного, Лісового та Земельного Кодексів України, а також Законів України, зокрема: «Про охорону навколишнього природного середовища» (1991р.); «Про охорону атмосферного повітря» (1992р.); «Про природно-заповідний фонд України» (1992р.); «Про екологічну експертизу» (1995р.); «Про відходи» (1998р.); «Про ліцензування певних видів господарської діяльності» (2000г.); «Про курорти» (2000р.); «Про особисте селянське господарство» (2003р.); «Про охорону земель» (2003р.); «Про державний контроль за використанням та охороною земель» (2003р.); «Про землеустрій» (2003р.); «Про туризм» (2003р.); «Про екологічну мережу України» (2004р.); «Про фермерське господарство» (2005р.); «Про планування та забудівлю території» (2006р.); «Про місцеве врядування в Україні» (2007р.).

Проте вкрай складна та неефективна система управління мікрорегіоном Тилігульського лиману негативно впливає на сталий розвиток території, яка підпорядковується двом Державним обласним адміністраціям – Одеській та Миколаївській. Так, питаннями функціонування та розвитку населених пунктів та господарств безпосередньо займаються районні адміністрації та сільради, а також відповідні обласні управління (економіки; праці та соціально захисту населення; розвитку інфраструктури та енергозбереження; регіонального розвитку, містобудування та архітектури; культури та туризму) та підрозділи районного підпорядкування, а управління агропромисловим комплексом, транспортним сектором та рекреаційною сферою здійснюється галузевими структурними підрозділами держадміністрацій обласного та районного рівнів.

Аналогічна вертикаль управління діє в сфері природокористування. Наприклад, в Одеські

області управління водними ресурсами покладено на Одеське обласне виробниче управління по водному господарству «Облводгосп», земельними – на Головне управління Держкомзему в Одеській області, лісовими – на Одеське обласне управління лісового та мисливського господарства, а ресурсами природно-заповідного фонду - на Державне управління охорони навколишнього природного середовища в Одеській області. Крім того, Тилігульський регіональний ландшафтний парк, поділений на дві територіально-адміністративні одиниці, має два центри управління – Одеську та Миколаївську адміністрації, що негативно впливає на якість управління територією, частина якої, за Рамсарською конвенцією, віднесена до водно-болотних угідь міжнародного значення.

Таким чином, проблема незбалансованого функціонування соціо-еколого-економічної системи Тилігульського лиману, значною мірою, зумовлена порушенням басейнового принципу управління його природно-ресурсним потенціалом та відсутністю єдиного суб'єкта управління ним. З огляду на це, забезпечення сталого розвитку зони Тилігульського лиману, перш за все, пов'язано з подоланням інституціональної неузгодженості – основної причини виникнення низки конфліктів, серед яких найбільш суттєвими є такі:

- змив у лиман забруднюючих речовин внаслідок використання в сільському господарстві мінеральних добрив, хімічних засобів захисту рослин та утворення відходів тваринництва;
- забруднення акваторії та прилеглих до лиману земель побутовим сміттям, каналізаційними стоками, що утворюються через відсутність в населених пунктах та дачних масивах централізованої каналізації та системи збору твердих побутових відходів;
- небезпека щодо збереження рідкісних видів флоти та фауни, порушення умов гніздування птахів як результат неконтрольованого перебування рекреантів, туристів, дачників та мешканців сіл на заповідних територіях;
- дефіцит та розмивання коштів, потрібних для утримання Тилігульського регіонального ландшафтного парку внаслідок існування двох адміністрацій, що є наслідком неузгодженості дій з боку владних структур;
- складність реалізації стратегії сталого розвитку мікрорегіону Тилігульського лиману через відсутність єдиного центру управління, а саме, басейнової ради лиману.

Існування перелічених конфліктів унеможливує на даний час реалізацію стратегії сталого розвитку зони Тилігульського лиману і є, перш за все, наслідком протилежності інтересів та очікувань зацікавлених сторін (стейкхолдерів):

- владних структур обласного, районного та місцевого рівнів;
- суб'єктів господарювання (мешканців прибережних сіл, керівництва та працівників Держпідприємства «Одеське лісове господарство», курорту «Коблево» тощо);
- сезонних природокористувачів (дачників);
- адміністрацій та співробітників обох частин Тилігульського регіонального ландшафтного парку (ТРЛП);
- рекреантів (відпочивальників, туристів, рибалок та ін.);
- партнерів (науковців, природоохоронних громадських організацій, ЗМІ).

Проте у збалансованому розвитку лиману та прилеглих територій безумовно зацікавлені представники всіх цільових груп «коаліції впливу», які відрізняються спрямованістю своїх інтересів, інтенсивністю антропогенного навантаження на екосистему лиману та залежністю від якості довкілля.

Неможливість одночасного задоволення інтересів всіх стейкхолдерів потребує їх ранжирування, зокрема, через встановлення рівня значущості щодо сталості зони Тилігульського лиману (табл. 3).

Пріоритизація зацікавлених сторін за значущістю дозволяє побудувати чітку ієрархію їх впливовості на стан екосистеми Тилігульського лиману і є одним з ключових моментів визначення стратегії управління відношеннями з ними щодо забезпечення сталого розвитку цієї території. Стейкхолдери з найвищим пріоритетом мають більший вплив на прийняття вірних стратегічних рішень, але врахування думок всіх зацікавлених сторін є принциповим щодо розробки планів на майбутнє. Крім того, якщо всі стейкхолдери залучені до циклу стратегічного планування на початкових стадіях, то великою стає вірогідність підтримки ними більшості заходів щодо сталого використання природно-ресурсного потенціалу мікрорегіону,



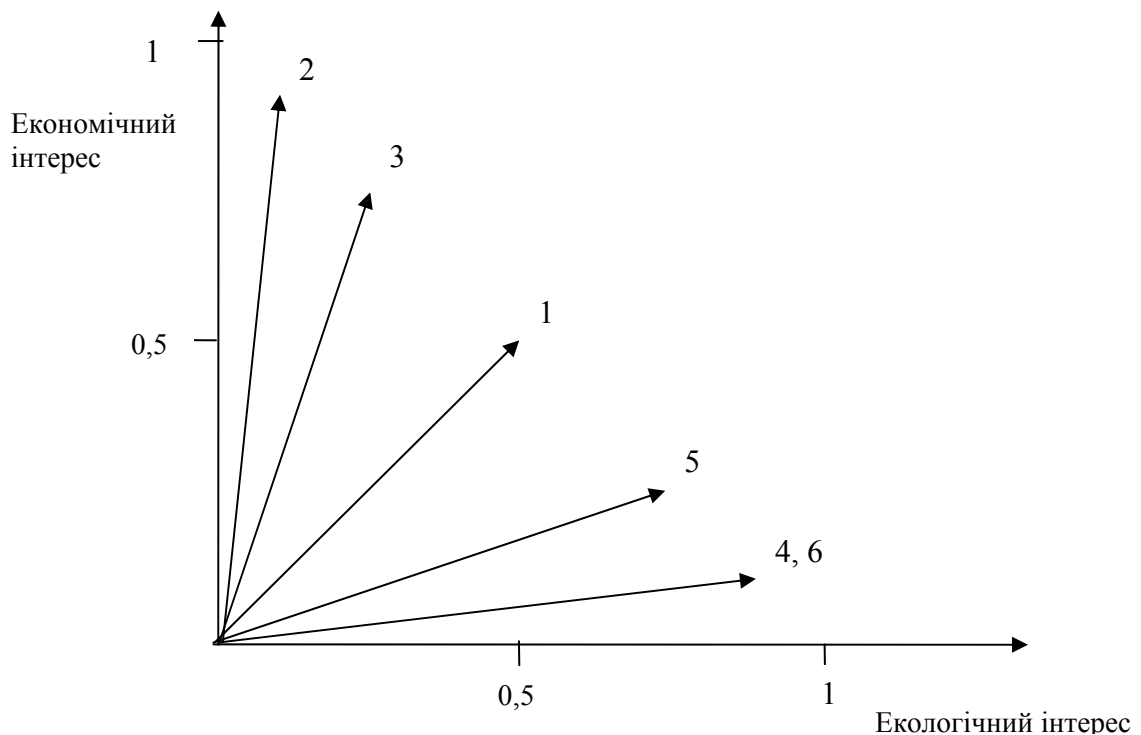
акумулювання знань, появи нових ідей та ініціатив, досягнення суспільної згоди, створення «капіталу співпраці».

Таблиця 3 - Значущість стейкхолдерів в забезпеченні сталого розвитку зони Тилігульського лиману.\*

Стейкхолдери	Інтереси		Здатність до впливу на екосистему лиману	Залежність від якості довкілля	Середньо-зважений показник впливу	Пріоритет значущості
	Економічні	Екологічні				
Влада	0,5	0,5	0,1	0,1	0,3	5
Суб'єкти господарювання	0,9	0,1	1	1	0,75	1
Сезонні природокористувачі	0,75	0,25	0,8	0,8	0,65	2
Адміністрація та співробітники ТРЛП	0,1	0,9	0	1	0,5	4
Рекреанти	0,25	0,75	0,4	1	0,6	3
Партнери	0,1	0,9	0,1	0,1	0,3	5

\*- розроблено автором за шкалою оцінювання (0; 1)

Оскільки інтереси всіх стейкхолдерів потенційно мають право бути взятими до уваги та задоволеними, то релевантним атрибутом аналізу зацікавлених сторін, з огляду на специфіку дослідження, коректно обрати рівень їх еколого-економічного інтересу, визначення якого може здійснюватися через модуль відповідного вектора, як показано на рис. 1.



1- влада; 2 – суб'єкти господарювання; 3 – сезонні природокористувачі;  
4 - адміністрація та співробітники ТРЛП; 5 - рекреанти; 6 - партнери

Рис.1 – Вектори еколого-економічного інтересу стейкхолдерів зони Тилігульського лиману.

За шкалою оцінювання (0; 1) значення рівня еколого-економічного інтересу дорівнюють

для влади – 0,71, суб'єктів господарювання – 0,91, сезонних природокористувачів – 0,79, адміністрації та працівників ТРЛП – 0,91, рекреантів – 0,79 та партнерів – 0,91.

Модель взаємодії зі стейкхолдерами ґрунтується не тільки на їх ідентифікації за рівнем еколого-економічної зацікавленості. Іншим релевантним атрибутом аналізу може бути ступінь впливу на навколишнє природне середовище, тобто здатність до впливу на екосистему лиману (див. табл. 3). Обрання найбільш вдалої стратегії управління асоційованими суб'єктами, згідно теорії стейкхолдерів, здійснюється за допомогою матриці «рівень впливу – рівень інтересу», відомої ще як модель Менделоу [9]. В квадранті матриці - «високий ступінь впливу – висока зацікавленість» - позиціонуються ключові стейкхолдери («ключові гравці»), стратегія управління якими формується, виходячи з умов, що треба або заручитися їх підтримкою, або передбачити час і гроші на подолання можливих наслідків їх протидії. Для досягнення стратегічної мети важливими, також, є стейкхолдери («сплячі чудовиська»), які зосереджені в другому квадранті матриці – «високий ступінь впливу – низька зацікавленість», тому стратегічне управління по відношенню до них здійснюється, враховуючи наявність значного потенціалу їхнього впливу, що не активізований, та необхідність забезпечення задоволення результатами і рівнем стосунків; таких стейкхолдерів потрібно стимулювати. До квадранту «високий рівень інтересу – низька впливовість» відносяться так звані «допитливі», які бажають, але не мають можливостей щодо реалізації стратегічних планів. Отже, стратегія управління ними спрямована на залучення їх до процесу прийняття рішень, використання їхніх здібностей та вміння зробити своїми союзниками стейкхолдерів з перших двох квадрантів. Й остання категорія стейкхолдерів – це «випадкові попутники», які позиціонуються у четвертому квадранті матриці – «низький вплив – низька зацікавленість». Управління відносинами з ними не потребує значних зусиль та уваги, проте їх слід регулярно інформувати на випадок, якщо вони стануть корисними для здійснення стратегічного розвитку.

Крім того, за допомогою «матриці Менделоу» можна виявити та оцінити [10]:

- які зацікавлені групи можуть, найвірогідніше, опинитися у ролі конфліктуючих сторін при визначенні стратегічних цілей;
- які асоційовані суб'єкти спроможні утворювати «коаліцію влади»;
- можливі напрями переміщення стейкхолдера за позиціями впливу або інтересу.

Матриця стейкхолдерів зони Тилігульського лиману (рис. 2), яка побудована з урахуванням ступенів впливу та зацікавленості кожної групи, дозволяє позиціонувати їх за наведеною вище класифікацією. Так, в забезпеченні сталого розвитку мікрорегіону беруть участь дві категорії асоційованих суб'єктів – «ключові гравці» та «допитливі». Вирішення соціальних, економічних та екологічних проблем зони Тилігульського лиману, зокрема, досягнення балансу відповідних інтересів, має здійснюватися через регулювання впливу на екосистему лиману «ключових гравців» та підвищення статусу впливовості «допитливих».

З цих міркувань, управління відносинами з представниками першої групи передбачає їх примушення, спонукання або переконання щодо переорієнтації діяльності в напрямку екологобезпечного існування, господарювання та відпочинку, як-то перехід на виробництво екологічно чистої сільськогосподарської продукції, відмова від використання будь-яких хімічних засобів захисту рослин на присадибних ділянках тощо. Проте відгук «ключових гравців» на застосування відповідних методів управління може відбуватися лише при зміні їхньої моделі поведінки, важливою підставою до якої є більш повна інформованість про існуючі загрози та можливості розв'язання проблемних питань природоохоронної спрямованості.

Підвищення статусу впливовості стейкхолдерів, які відносяться до групи «допитливих», може бути реалізовано за рахунок:

- впровадження владними структурами в практичну площину інструментів стимулювання «ключових гравців» щодо екологізації їхньої поведінки;
- прагнення рекреантів отримувати якісні екологобезпечні послуги з відпочинку та оздоровлення, користуватися розвинутою рекреаційною інфраструктурою, яка не порушує сталість екосистеми лиману;

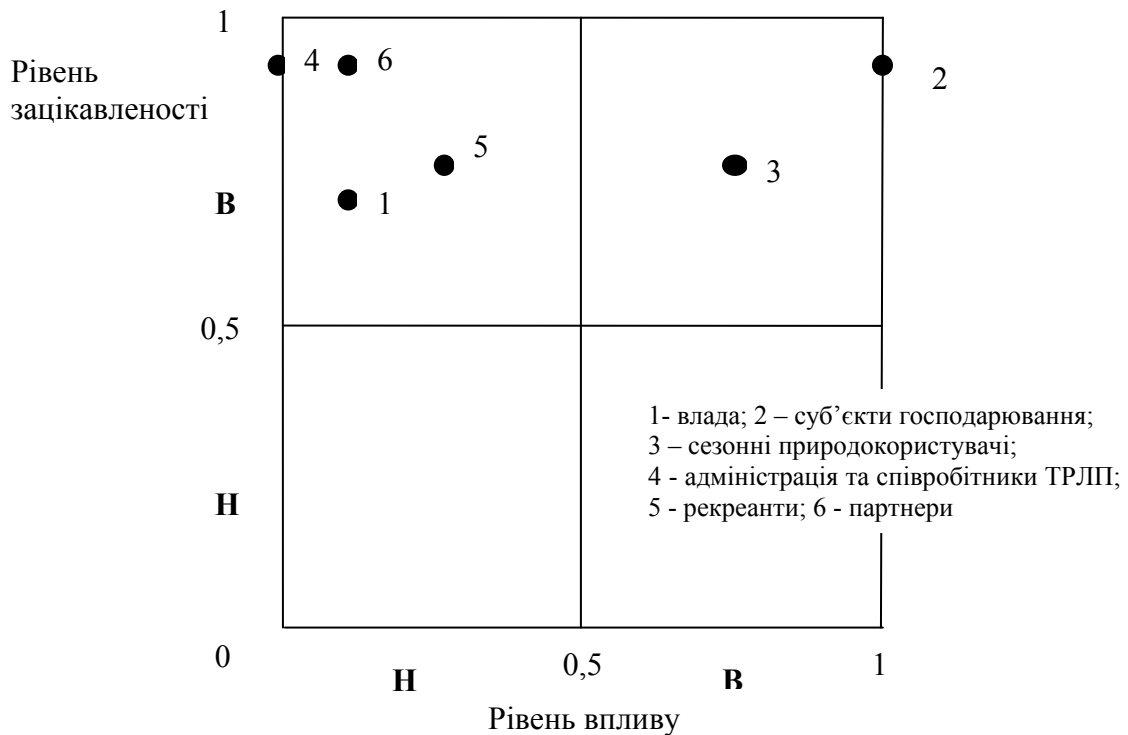


Рис.2 – Матриця стейкхолдерів зони Тилігульського лиману.

- спрямування зусиль науковців, природоохоронних громадських організацій, ЗМІ, адміністрацій та співробітників Тилігульського регіонального ландшафтної парку на створення комунікативної стратегії, необхідної для покращення інформованості інших категорій стейкхолдерів та забезпечення координації дій щодо відтворення сталості лиману та прилеглих територій.

Проте запропоновані заходи не дадуть до бажаного ефекту, якщо відсутній центр інтегрованого управління ресурсами природно-господарської системи Тилігульського лиману. Це може бути, наприклад, Рада лиману, яка виконуватиме роль постійно діючого, дорадчого робочого органу, до складу якого мають увійти представники всіх категорій стейкхолдерів, а метою його функціонування має бути створення ефективного організаційно-економічного механізму узгодження соціально-економічних потреб зацікавлених груп з можливостями екосистеми та прилеглих до лиману територій на основі принципу інтеграції «три К» - комунікація (встановлення контактів і обмін інформацією), кооперація (співробітництво), координація (узгодженість планів і дій) [8].

Створення Ради лиману є вкрай важливим питанням для реалізації стратегії сталого економіко-екологічного розвитку Тилігульського лиману і таким, що потребує багатоаспектного дослідження.

**Висновки.** Стратегія сталого еколого-економічного розвитку передбачає, що структура економіки, спеціалізація виробництва повинні в сучасних умовах якнайтісніше узгоджуватися з наявними ресурсами, продуктивним, відтворювальним потенціалом навколишнього середовища. З огляду на це, інтегроване управління ресурсами Тилігульського лиману має здійснюватися за так званим «басейновим принципом», який, значною мірою, відповідає умовам безконфліктного співіснування природокористувачів з екосистемою регіону. Така стратегія управління передбачає, перш за все, узгодження інтересів зацікавлених сторін, якими в межах природно-господарського комплексу Тилігульського лиману є дві категорії стейкхолдерів: «ключові гравці» та «допитливі». Враховуючи відмінність у рівні їх економіко-екологічних інтересів та здатності впливати на сталість екосистеми лиману і прилеглих територій, управління відносинами з ними має відбуватися шляхом екологізації поведінкової моделі перших та підвищення впливовості других, що зумовлює доцільність використання

тріади методів ієрархічного управління та різноманітних інструментів поширення екологічної інформації.

### Список літератури

1. *Офіційний сайт* регіонального ландшафтного парку “Тилигульський”. - Режим доступу: <http://tiligul.org/index.html>
2. *Богданович Ю.* Лиман можно спасти работая сообща // Деловая Одесса (04.06.12). - Режим доступу: <http://dilova.com.ua/>
3. *Статистичний щорічник* Одеської області за 2010 рік. – Одеса: Головне управління статистики в Одеській області, 2011. – 540 с.
4. *Статистичний щорічник* Миколаївської області за 2010 рік / за ред П.Ф. Зацаринського. Головне управління статистики у Миколаївській обл. – Миколаїв, 2011. – 514 с.
5. *Отдых в поселке* Коблево на Черном море. - Режим доступу: <http://www.koblevo.seatour.in.ua/>
6. *Кто перекрывает* кислород лиманам // Рабочая Газета (27.04.2011). - Режим доступу: <http://rg.kiev.ua/page5/article21186/>
7. *Трубопроводный транспорт* Украины. Проблемы и перспективы развития. - Режим доступу: <http://www.snegu.net/single.php?articles/20100602100106>
8. *Степанов В.Н.* Социально-экономическое состояние района Тилигульского лимана / *В.Н. Степанов, Е.В. Степанова* // Причерноморский экологический бюллетень. – 2004.- № 2. – С. 99-109.
9. *Угольницкий Г.А.* Устойчивое развитие организаций. Системный анализ, математические модели и информационные технологии управления / *Г.А. Угольницкий.* – М.: Издательство физико-математической литературы, 2011. – 320 с.
10. *Канаев А.* Современные подходы к организации корпоративного управления / *А. Канаев.* - Режим доступу: <http://www.sice.ru/cnts/2259.html>

#### **Применение методологии стейкхолдер-менеджмента в обеспечении устойчивого развития Тилигульского лимана. Губанова Е.Р.**

*Определены факторы нарушения устойчивости экосистемы Тилигульского лимана и обосновано влияние расхождения интересов стейкхолдеров на усиление эколого-экономических противоречий территориального развития. Проведено позиционирование ассоциированных субъектов по значимости для обеспечения устойчивого развития микрорегиона. Предложена стратегия управления стейкхолдерами зоны Тилигульского лимана.*

**Ключевые слова:** устойчивое развитие, зона Тилигульского лимана, стейкхолдеры, стратегия управления заинтересованными сторонами.

#### **Application of the methodology stakeholder management in sustainable development of Tiligul liman. Gubanova E.R.**

*Factors of ecosystem resilience of the Tiligul liman were identified and impact of differences in interests of stakeholders on strengthen of the environmental and economic contradictions of territorial development is justified. The positioning of associated entities by importance for the sustainable development of microregion is held. Stakeholder management strategy of the Tiligul liman zone is proposed.*

**Keywords:** sustainable development, zone of Tiligul liman, stakeholders, stakeholder management strategy.

УДК 330

**Павленко О.П., к.е.н.**

*Одеський державний екологічний університет*

## **ЕКОНОМІКО-ЕКОЛОГІЧНІ ОСНОВИ КОМПЛЕКСНОГО МОРСЬКОГО ПЛАНУВАННЯ**

*Стаття присвячена системі комплексного морського планування взагалі й зокрема стосується прибережної зони морів. В статті представлений аналіз особливостей морського планування, а також причин наявних ускладнень такого планування та рекомендації щодо його вдосконалення.*

**Ключові слова:** *Чорне море, морське планування, прибережна зона, прибережна смуга морів, інтегроване управління.*

**Постановка питання.** У процесі розвитку прибережної зони Чорного моря виникає серйозне навантаження, що викликане різноманітними видами антропогенної діяльності, такими як туризм, транспорт, рибальство та вирощування аквакультури, вироблення електроенергії тощо. Разом з необхідністю захисту навколишнього середовища та загрозою глобальної зміни клімату, це навантаження спричиняє численні сучасні і формує потенційні конфлікти.

Основним завданням прибережного розвитку є таке використання економічного потенціалу морів, при якому можливе створення максимальної синергії між групами користувачів із різними інтересами та запобіганням конфліктам.

Значна частина продуктивних ресурсів, що мають виняткове природне, історичне, культурне та економічне значення, локалізовані на прибережних територіях, і саме тому ці території з давніх часів приваблювали людей для проживання і діяльності. Традиційна система природокористування та його регулювання в прибережних регіонах вже не може протистояти таким явищам і тенденціям, як надмірна експлуатація і деградація прибережних водних і суходільних екосистем, посилення забруднення та депонування відходів, привнесення чужорідних видів та ін. Сподіваючись на збалансований розвиток, не можна використовувати ресурсів більше, ніж прибережні екосистеми знатні відтворити, й не можна в них депонувати відходів більше, ніж вони здатні асимілювати.

Саме тому раціоналізація комплексного управління природокористуванням та й взагалі всією діяльністю в прибережних зонах має бути спрямована на гармонізацію економічних, соціальних та екологічних аспектів людської діяльності.

**Сучасне обговорення.** Українська практика управління прибережною смугою морів (ПСМ) включає етапи розгляду ПСМ як об'єкта наукових досліджень (з початку 1990-х років), об'єкта національної політики (з другої половини 1990-х років) та об'єкта інтегрованого управління (з кінця 1990-х років). Саме на такому підході побудовані проекти Концепції національної політики і стратегії інтегрованого управління прибережною смугою Чорного і Азовського морів України (1997), Концепції закону України "Про природокористування у прибережній смузі Чорного і Азовського морів", окремі положення Загальнодержавної програми охорони та відтворення довкілля Азовського і Чорного морів (2001) та проекту Закону України «Про прибережну смугу морів» (2004).

До удосконалення політики і механізмів управління перш за все спонукає стан прибережної смуги морів, який залишається невтішним і визначається, з одного боку, об'єктивними обставинами, з іншого - нераціональною практикою природокористування і розвитку населених пунктів. Це є прямим наслідком недоліків у функціонуванні системи планування і управління, а також прорахунків у прийнятті важливих управлінських рішень.

Прибережна смуга морів є комплексною природно-господарською системою, а тому їй вимагає комплексного підходу до її організації, використання і планування розвитку. В управлінні ПСМ мають бути присутні належна горизонтальна (між адміністративними одиницями в межах ПСМ), вертикальна (між місцевими, регіональними та центральними органами влади) та секторальна (між комунальним, природоохоронним, аграрним, промислово-портовим та іншими секторами) координація і кооперація [1].

**Метою** даного дослідження є формування теоретичної основи системи комплексного морського управління, зокрема, прибережної зони морів, яка склалася на даний час в Україні. Важливим є також аналіз її особливостей, позитивних сторін і недоліків, причин ускладнень.

Територія України складає 603,7 тис. км<sup>2</sup> й відрізняється значною неоднорідністю в розподілі природних умов, ресурсів і населення, що в свою чергу є головною причиною нерівномірного розвитку різних регіонів країни. Саме тому територіальна діяльність є різноплановою. Вона охоплює діяльність промислового (в тому числі й гірничодобувного), сільськогосподарського, транспортного (в тому числі й портового), комунального, будівельного, військового та інших секторів. Останнім часом поряд зі звичними напрямками діяльності (наприклад, містобудуванням), все більш помітними стають розвиток природоохоронних територій, рекреаційної та туристичної індустрії. З огляду на складний комплексний характер використання територій, територіальна діяльність стала складовою частиною державного регулювання не лише у сфері містобудування, будівництва та комунального господарства, а й в інших сферах.

Система територіального планування в Україні включає: об'єкт планування (землі та об'єкти загальнодержавної, приватної, комунальної власності та власності місцевих громад); інституційні рамки (органи законодавчої, виконавчої, судової влади та місцевого самоврядування, установи, організації та підприємства, що виступають суб'єктами процесу планування та використання територій); нормативно-правову базу (закони, законодавчі акти та нормативні документи, що регулюють правовідносини, які склалися при плануванні розвитку та використанні територій); ресурсне забезпечення (людські, майнові, фінансові та інші ресурси, необхідні для планування розвитку та використання територій).

Відносно короткий період розвитку Української держави позначився серйозними труднощами, пов'язаними з проблемами як політичного, так і економічного характеру, але в цілому можна констатувати, що на сьогоднішній день в державі функціонує розвинута система планування і використання територій, яка загалом відповідає потребам і протидіє викликам сьогодення.

Українське узбережжя Чорного моря перебуває під зростаючим тиском через збільшення вимог використання та виникаючих, у зв'язку із цим, конфліктів. А актуальними в цьому контексті є підсилення інструментів просторового планування в рамках комплексного управління прибережними зонами і морськими районами за допомогою:

- підготовки пропозиції про морський план використання 12-мильної морської зони Одеської агломерації за участю всіх зацікавлених сторін і відповідно до принципів комплексного управління прибережною смугою, що допоможе розв'язати існуючі й майбутні можливі конфлікти, що ведуть до додаткових інвестицій (планування безпеки), поліпшить стан навколишнього середовища й буде сприяти розвитку туризму (поліпшення якості узбережжя);
- розробку рекомендацій для майбутнього виконання стратегії комплексного управління прибережною смугою і введення морського планування на місцевому, регіональному, національному й міжнародному (Чорноморська Комісія) рівні в Україні;
- поліпшення координації й інтеграції між різними установами, владними структурами й організаціями, відповідальними за комплексне керування прибережними зонами (регіональними, національними, міжнародними).

Порівняно з іншими причорноморськими державами Україна володіє найдовшою береговою лінією. Так, загальна довжина берегової лінії Азовського моря складає 1472 км, з них половина (732 км) належить береговій лінії України. Українська частина берегової лінії Чорного моря (від дельти Дунаю до мису Такил у Керченській протоці) складає 1628 км [2].

В цілому прибережна смуга морів являє собою унікальний природно-господарський комплекс, сформований завдяки різноманіттю середовищ (таких, зокрема, як пляжі, лимани, сільськогосподарські угіддя, урбанізовані території, промислові комплекси та ін.), природних умов і ресурсів [5].

В науковій літературі можна зустрітися з багатьма термінами, що викликають подібні асоціації. Так, вживають терміни «приморська зона» [3], «берегова (прибережна) зона» [4], «прибережні райони» [5], «прибережні регіони» [6] тощо. В принципі, зрозуміло, про що йде мова, тому особливих зауважень щодо адекватності застосування цих термінів не виникає, але залишається відчуття дискомфорту й невпевненості в тому, що автори розуміють одне й те саме під конкретним терміном.

Нераціональне використання земельних ресурсів прибережних зон і відсутність грамотних науково-обґрунтованих управлінських підходів часто призводять до таких негативних, у тому числі і для людини наслідків: втрата економічно цінних земельних ресурсів; втрата власності (житлових і господарських будівель, об'єктів інфраструктури); зникнення морських і наземних видів тварин і рослин; втрата об'єктів, що мають історичну, культурну та археологічну цінність; обмеження громадського доступу до прибережних ресурсів [6].

Якщо розглядати ПСМ як цілісну систему, то в загальному вигляді можна говорити про наступні види життєдіяльності та її територіях: базові види діяльності, пов'язані з забезпечення населення та об'єктів господарювання продовольством, водою та енергією (включаючи їх виробництво); соціальні види діяльності, пов'язані з житловим будівництвом, рекреацією та оздоровленням; економічні види діяльності, які включають промисловий розвиток, розвідку та добування корисних копалин, транспорт; суспільні види діяльності, пов'язані з охороною та збереженням навколишнього природного середовища (рис. 1).

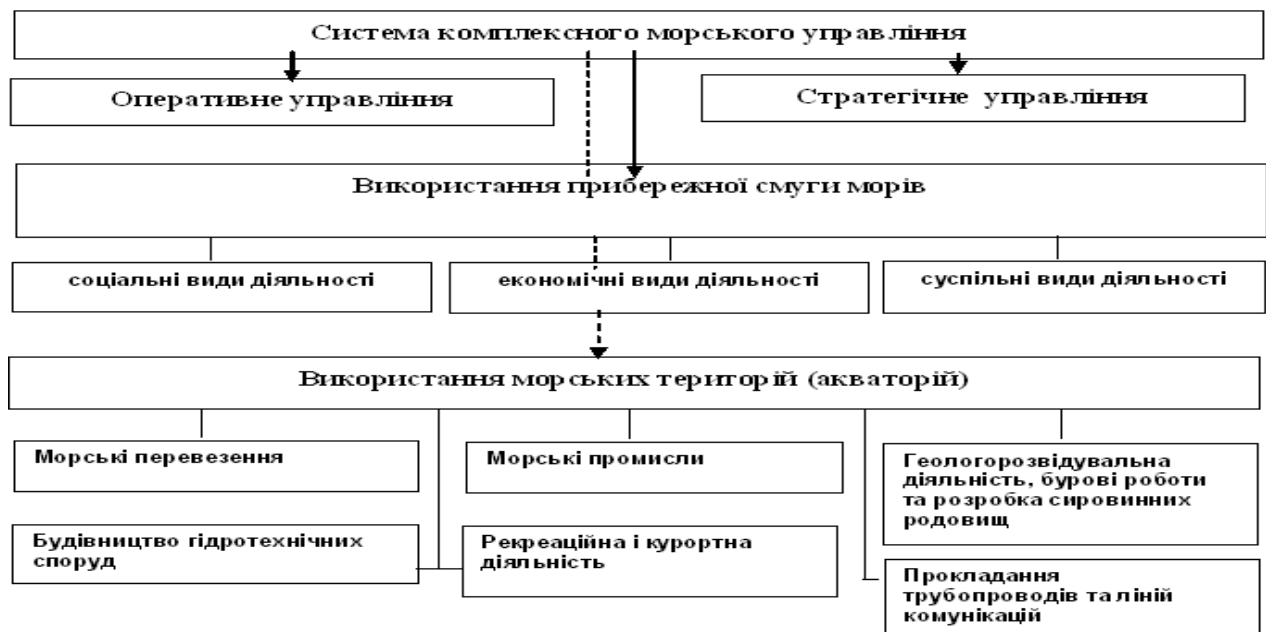


Рис.1 - Структура об'єктів комплексного морського управління

У системі морського управління виділяють дві складові: управляючу систему (суб'єкт управління) і керовану систему (об'єкт управління). Завдання суб'єкта управління полягає в тому, щоб спрямовувати розвиток об'єкта у бажаному напрямку через управлінський вплив.

В якості об'єкта управління виступають морські прибережні території (акваторії), що входять до прибережної смуги морів України, також використовуються для різноманітних господарських та інших потреб.

Якщо акцентувати увагу на економічних методах комплексного управління в прибережній захисній смузі, то перш за все найбільш ефективними слід визнати наступні: впровадження додаткового податку на приватні об'єкти нерухомості в прибережній зоні; компенсаційні виплати суб'єктам, що стимулюють сталий розвиток та відновлення екосистем даних територій; розробка на основі врахування фактору унікальності і впровадження розрахунку втрат і збитків які завдаються під час освоєння прибережних зон; страхування екологічних ризиків; посилення штрафного санкціонування щодо здійснення процесу забудови прибережної зони за відсутності проектної документації; створення окремої методології експертної оцінки земельних ділянок прибережних територій; аналіз чинників інвестиційної привабливості території, та врахування їх під час створення економічного механізму як важеля, що координує використання ресурсів прибережних захисних смуг [6].

Складність природних умов і можливостей ПСМ з необхідністю вимагає збалансованого підходу до регулювання використання цих умов і ресурсів, а з огляду на широкий спектр користувачів - ще й на узгодженість їх планів і дій.

А вже на початок 1990-х років комплексне управління прибережними смугами стало невід'ємним елементом політики збалансованого розвитку. У Главі 17 «Порядку денного на XXI століття» [7] сказано: «Кожна прибережна держава повинна розглянути питання про створення або, за необхідністю, зміцнення відповідних механізмів координації ...для комплексного раціонального використання і сталого розвитку прибережних та морських районів і їх ресурсів на місцевому і національному рівнях». Таким чином відбулося планетарне освячення одного з ключових управлінських підходів до використання природних ресурсів прибережних екосистем - інтегрованого управління прибережними смугами океанів, морів та інших значимих водних об'єктів.

### **Висновки.**

1. Складність географічних, економічних, демографічних та інших характеристик і особливостей території країни вимагає відповідної системи планування територіального розвитку. У системі морського управління виділяють дві складові: управляючу систему (суб'єкт управління) і керовану систему (об'єкт управління). Завдання суб'єкта управління полягає в тому, щоб спрямовувати розвиток об'єкта у бажаному напрямку через управлінський вплив. В якості об'єкта управління виступають морські прибережні території (акваторії), що входять до прибережної смуги морів України, також використовуються для різноманітних господарських та інших потреб.

3. Основним елементом будь-яких управлінських схем чи програм є планування. Планування починається з аналізу проблеми і стану об'єкту управління. В нашій ситуації об'єктом управління є прибережна смуга морів, тому першим кроком до інтегрованого управління є інвентаризація прибережної смуги морів - картографування й зонування територій, оцінка природних ресурсів, інвентаризація суб'єктів господарської діяльності, об'єктів забруднення території й акваторії, оцінка потреб і сценаріїв розвитку і т.п. Лише на підставі інвентаризації територій і об'єктів ПСМ, оцінки сценаріїв розвитку можна сформулювати адекватну мету і цілі та розробити заходи, спрямовані на їх досягнення. Зауважимо, що мова йде про планування комплексне, а не секторальне, тому цей підхід ще й стає економічно вигідним, оскільки створення комплексного плану буде дешевшим, ніж розробка секторальних планів та їх узгодження.

4. На етапі комплексного планування закладаються основи координації та інтеграції-міжсекторальної (узгодження інтересів різних секторів), горизонтальної (узгодження планів сусідніх адміністративних одиниць), вертикальної (узгодження позицій місцевих, регіональних та центральних органів влади), науково-управлінської (наукове забезпечення прийняття



управлінських рішень), міжнародної (узгодження політик, обмін досвідом та використання кращих практик і технологій). Ці положення мають стати компонентом комплексного плану використання прибережних територій. При цьому основна мета комплексного морського планування - це визначення найбільш оптимального вектору сталого розвитку, на основі якого можна максимально ефективно організувати господарську діяльність, що забезпечить збереження і відновлення природно-ресурсного потенціалу.

### Список літератури

1. *Просторове планування розвитку прибережної смуги морів України* / В.І. Карамушка [Укр НЦЕМ]. — Одеса: Типографія «Препринт Бистро», 2009. — 55 с.
2. *Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2011 році*. - К. : Міністерство екології та природних ресурсів України, LAT & K. - 2012. - 258 с.
3. *Студеніков І. В., Дьяков О. А.* Інтегроване управління приморською зоною: базові поняття, принципи і значення для сталого розвитку України // Стратегічна панорама. Щоквартальний журнал Ради національної безпеки і оборони України. - Київ, 2005. - № 3. - С. 107-116;
4. *Model Law on Sustainable Management of Coastal Zones and European Code of Conduct for Coastal Zones*. Committee responsible for the activities of the Council of Europe in the field of biological and landscape diversity. Nature and Environment Series, N 101. Strasbourg: Council of Europe Publishing, 2000.
5. *Формування системи інтегрованого управління морським природокористуванням*. Автореф. дис. канд. екон. наук: 08.08.01 / К.В. Степанова; НАН України. Ін-т пробл. ринку та екон.-екол. дослідж. — Одеса:, 2005. — 21 с.
6. *Фоменко В.А.* Теоретико-концептуальні положення інтегрованого розвитку прибережних територій Азово-Чорноморського регіону / Фоменко В.А. — Економічні інновації. — № 44. — 2011. — С. 304-314.
7. *Програма дій «Порядок денний на XXI століття»*: Ухвалена конференцією ООН з на-вколишнього середовища і розвитку в Ріо-де-Жанейро (Саміт «Планета Земля», 1992 р.): Пер. з англ. — 2-ге вид. — К.: Інтелсфера, 2000. — 360 с.

#### **Экономико-экологические основы комплексного морского планирования. Павленко Е.П.**

*Статья посвящена системе комплексного морского планирования в общем и в частности касается прибрежной зоны морей. В статье представлен анализ особенностей морского планирования, причин существующих сложностей такого планирования и рекомендации по его усовершенствованию.*

**Ключевые слова:** Черное море, морское планирование, прибрежная зона, прибрежная полоса морей, интегрированное управление.

#### **Economic and environmental bases of integrated marine planning. Pavlenko O.P.**

*The article is devoted to a comprehensive system of marine planning in general and in particular coastal seas. This paper analyzes the characteristics of marine planning, and causes existing complications, recommendations for its development and improvement.*

**Keywords:** Black Sea marine planning, coastal zone, coastal zone, integrated management.

## ІНСТИТУЦІОНАЛЬНІ ПІДХОДИ РОЗВИТКУ ЕКОЛОГІЧНОГО ПІДПРИЄМНИЦТВА В РЕКРЕАЦІЙНО-ТУРИСТИЧНІЙ СФЕРІ

*Визначено зміст інституціональних підходів розвитку екологічного підприємництва. Здійснено систематизацію існуючих доктринальних форм інституціональних підходів розвитку. Розглянуто інституціональні підходи розвитку екологічного підприємництва в рекреаційно-туристичній сфері.*

**Ключові слова:** екологічне підприємництво, інституціональний підхід, рекреаційно-туристична сфера, туризм, рекреація.

**Постановка проблеми.** Держава Україна, з огляду на географічні чинники, має унікальні можливості до еволюційного розвитку рекреаційно-туристичної сфери господарювання, що в свою чергу є одним з потенційно нон-агресивних векторів економічних зрушень по відношенню до екології. Екологічне підприємництво, як один з найдієвіших методів диверсифікації капіталів, має унікальну економічну еластичність, що зумовлює його статус, як «перспективного для впровадження» в рекреаційно-туристичній сфері. Проте, наявність вектору економічних зрушень та дієвого методу диверсифікації капіталів не є достатнім для активування процесів економічної конвергенції навіть на доктринальному рівні, що призводить до зменшення практичної аксіологічної характеристики обох елементів. З огляду на складність процесів економічної конвергенції, вельми важливим є пре-конфігурація обох елементів, що найбільш доцільно проводити у вигляді формування інституціональних підходів до розвитку.

**Аналіз останніх досліджень.** Теоретичним питанням розвитку екологічного підприємництва у аспекті теми даного дослідження присвятили свої праці такі науковці, як Андрєєва Н.М., Бевзенко В., Борейко В., Буркинський Б.В., Воробйова О.А., Галушкіна Т.П., Гаман П.І., Голубець М.А., Дишловий І.М., Мартинюк О.В., Нездоймінов С.Г., Новосельська Л.І., Носова О.В., Реутов В.Є., Стеценко М., Турянський Ю.І., Фесенко О.А., Харічков С.К. та інші.

**Метою дослідження** є здійснення аналізу змісту інституціональних підходів розвитку екологічного підприємництва в рекреаційно-туристичній сфері.

**Виклад основного матеріалу.** Продукування дієвих інституціональних підходів до економічного розвитку завжди пов'язане з цілою низкою проблем. По-перше, інституціональна теорія одна з найбільш не уніфікованих теорій, що зумовлює критичний плюралізм дефініцій. По-друге, інституціональні підходи розвитку, що застосовуються в економічному середовищі завжди повинні бути системно структурованими. По-третє, інституціональні підходи розвитку в економічній сфері мають вельми низький коефіцієнт можливої уніфікації, на відміну від подібних підходів в юридичній, стратифікаційній та інших сферах. По-четверте, економічні зрушення зумовлюють перманентну зміну коефіцієнту корисної дії вже впроваджених інституціональних підходів (від часткової втрати ефекту корисної дії до повного нівелювання корисності або, навіть, до створення прецедентів негативного впливу на один чи кілька елементів системи). Це правило «економічної мобільності» зумовлює неможливість створення уніфікованого інституціонального підходу без урахування темпоральних характеристик та вимагає від суб'єкту впливу постійної кореляції чи повної заміни підходу, що в свою чергу в значній мірі обґрунтовує потребу в формуванні плюралізму підходів всупереч моно структурній моделі. В той же час, як зазначає В.М. Коритцев, інституціональні підходи щодо дослідження економіки, є традиційним способом фактологічного та теоретичного аналізу, який надає можливість здійснити суб'єктне моделювання економічної поведінки [1].

Форми інституціональних підходів розвитку екологічного підприємництва включають в себе наступні обов'язкові елементи, які є унікальними для кожної окремої форми: суб'єкти регуляторного впливу, об'єкти регуляції, предмет економічних відносин, сталі економічні моделі, методи реалізації цілей та завдань, засоби економічної корекції та засоби протидії негативному впливу на регульовані відносини. Саме зазначена система елементів критично відрізняє економічні інституціональні підходи від галузей права, що ототожнюються більшістю прихильників неklasичної інституціональної теорії.

Виходячи з окреслених вище концептуальних засад, доцільно провести систематизацію наявних доктринальних форм інституціональних підходів розвитку економічного підприємництва. Як зазначає О.В. Носова, у якості загальних теоретико-методологічних засад дослідження інституціональних підходів, слід виокремлювати певні риси, характерні для кожного окремого напрямку, що було враховано при виокремленні авторських форм інституціональних підходів (див. табл. 1.)[2].

Таблиця 1-Форми інституціональних підходів розвитку економічного підприємництва

Форма	Зміст
Індивідуально-структурна	Виділяє як домінуючий структурний елемент суб'єкта регуляторного впливу, проводячи відносну кореляцію між індивідуальним (особистим) та інституціональним (підприємства, установи, організації) аспектами. Слід зазначити, що дана форма під індивідуальним (особистим) має на увазі не усіх фізичних осіб, що приймають участь в економічних відносинах (фізичні особи – підприємці), а лише тих, що мають відповідні владні повноваження (державні службовці, представники органів місцевого самоврядування та інші). Інституціональний аспект характеризує вплив на економічні відносини з боку усієї установи чи організації, що виявляється у прийнятті колегіальних (імперсональних) та одноособових імперативних рішень від імені всієї установи. Індивідуальні та інституціональні аспекти в розрізі одноособового прийняття рішення відрізняються тим, що прийняття рішення адміністративного впливу в інституціональному аспекті завжди пов'язане з керуючим статусом особи, що його приймає (директор, начальник), натомість, як індивідуальний аспект передбачає нормативно-обумовлені повноваження щодо адміністративного впливу, які в більшій мірі реалізуються у актах адміністративного реагування (податкові інспектори, слідчі і т.д.). Зазначена форма за методом впливу у переважній більшості використовує імперативний метод, що пов'язаний з реалізацією регуляторного впливу. Серед базових недоліків цієї форми інституціонального підходу, можна зазначити: відсутність урахування економічної кон'юнктури; невисока ефективність імперативного методу регулювання в економічних відносинах; залежність ефективності від суб'єктивного фактору і т.ін.
Статусна	Передбачає базовим елементом економічний статус суб'єкта відносин. Економічний статус, на відміну від юридичного, не полягає у правосуб'єктності господарюючої особи, а включає в себе цілу низку економічних показників, як-то, рівень капіталізації, статутний капітал, економічна рентабельність виробництва та інші показники. Метод регулювання є диспозитивним. Статусна форма має суттєве значення для розуміння структури суб'єктів ринку, проте ігнорування владно - імперативних аспектів може призвести до виникнення у подальшому певних недоліків та упущень, а саме: збільшення тривалості економічних трансформацій; критичне зростання економічних ризиків, відсутність можливості стратегічного планування розвитку екологічного підприємства і т.д.

Продовження табл.1

Форма	Зміст
Нормативна	Акцентує увагу на правовому полі економічних правовідносин. Слід зазначити, що нормативна форма не звужує інструмент регулювання до нормативно-правових актів (закони, підзаконні акти і т. ін.), а повністю охоплює всі норми права, в тому числі і економічні звичаї, економічні традиції та ін. Візуалізацію існуючих правил ведення економічної діяльності важко переоцінити, проте, побудова регуляторного впливу лише на нормативних моделях має цілу низку недоліків: низький коефіцієнт корисної дії, що суперечить законам економіки; повне нівелювання корисної дії за умови відсутності режиму законності та невисокого рівня правової культури; постійна потреба в адмініструванні рівня виконання вимог нормативів, що призводить до значних витрат; і т.п.
Біхевіористська	Одна з найсуб'єктивніших форм структурування економічних інститутів, що будується на поведінкових моделях, які обумовлені аксіологічними переконаннями та аспектами персональної соціалізації. Зазначена форма формує інститути як на особистісному рівні, так і на стратифікаційному. Серед недоліків можна окреслити такі: короткий термін валідності аналітичних результатів; над структурованість первісного рівня аналізу; неможливість передбачення всіх перемінних при стратегічному плануванні, що призводить до суттєвої можливості виникнення форс-мажорних ситуацій і т.п.
Атрактивно-біфуркаційна	Візуалізує два базових елементи економічної діяльності: економічна привабливість та економічна стійкість (внутрішньо-структурна та зовнішня). Сфера атракції вельми важлива як в суто бізнесовому напрямі, так і в сфері державного індикативного регулювання, що дозволяє створювати економічні маркери. Економічна стійкість дозволяє оцінити наскільки суб'єкт економічних відносин стійкий у своїй внутрішній структурі (виробництво, трудові ресурси і т.п.) та наскільки він готовий для адекватної відповіді на виклики ринкової кон'юнктури. До недоліків даної форми варто віднести: ігнорування нормативних аспектів розвитку; потреба в постійному корегуванні регуляторного впливу; наукоємність та ресурсоємність і т. ін.
Економічної мобільності	Спрямована на економічні відносини, як на головний чинник розвитку ринку. На відміну від дослідження статичних моделей (статусу і т.п.), економічна мобільність зорієнтована на виявлення усіх економічно значущих відносин та їх наступній систематизації. Якісний склад економічної динаміки досліджується на мікро-, мезо-, макро-, національному та міжнародному рівні. Серед вад зазначеної форми слід визначити: необхідність перманентної кореляції в умовах відсутності циклічності; хвильовий характер багатьох методів регулювання (відкладена на визначений чи на опціональний строк дія); неможливість встановлення валідних результатів без урахування зовнішніх та змінних факторів; і т.п.
Комплексної конвергенції	Синтетична форма інституціональних підходів розвитку екологічного підприємництва, що поєднує в собі риси усіх зазначених вище форм. Безумовним є той факт, що комплексна конвергенція має найбільшу ресурсоємність серед усіх форм, проте, якісна побудова дослідження та структурування висновків дозволяють досягати сталого розвитку економіки в цілому без критичного зміщення акцентів. Недоліки даної форми: ресурсоємність; наукоємність; складність систематизації висновків в умовах різномірності показників; і т.п.

Формою для побудови системи інституціональних підходів розвитку екологічного підприємництва в рекреаційно-туристичній сфері обрано форму комплексної конвергенції. Жоден з інституціональних підходів не є темпорально незмінним з огляду на постійні динамічні зміни в структурі економічних відносин, тому доцільним є формування низки інституціональних підходів з різними сферами впливу з метою можливості створення якісного та поступового еволюційного руху. Організація цілісної системи інституціональних підходів розвитку є обов'язковим елементом пре-адміністрування для суб'єкту впливу. Формування лише одного інституціонального підходу перед початком впливу на предмет і об'єкт відносин неминуче призведе до відкладених негативних наслідків.

Серед інституціональних підходів розвитку екологічного підприємництва в рекреаційно-туристичній сфері доцільно виділити:

1) Маржинальна оптимізація (англ.:margin optimization) – системний вплив з боку влади на економічні відносини в рекреаційно-туристичній сфері за допомогою індикативно-диспозитивних методів. Суб'єкт впливу: держава, органи місцевого самоврядування. Мета: досягнення оптимального рівня економічних показників (об'єм продажу, собівартість, прибутку)/нівелювання стагнаційних процесів/диверсифікація капіталу). Інструменти впливу: податкові пільги; дотації; угод сумісних проектів і т.п. Загрози при застосуванні: низький рівень акцепту з боку бізнесу за умови економічної недосконалості оферти; перманентні втрати з боку держави в бюджетній сфері; можливість виникнення економічних перекосів при надмірному адмініструванні лише екологічного підприємництва в рекреаційно-туристичній сфері; і т. ін..

2) Поміркований етатизм (англ.:moderate etatism) – формування ринкових відносин в рекреаційно-туристичній сфері за умови повного домінування волі держави. Суб'єкт впливу: держава. Мета: системні зміни в рекреаційно-туристичній сфері за висунутою державою моделлю. Інструменти впливу: санкції; заборони; ліцензування за непрозорими процедурами/принципами і т. ін. Загрози при застосуванні: висока вірогідність зниження присутності приватного сектору у векторі екологічного підприємництва в рекреаційно-туристичній сфері; монополізаційні процеси; стагнаційні процеси та формування прецедентів відставання в технологічному аспекті; і т.п.

3) Сегментарна валоризація (англ.:segmental valorisation) – діяльність держави з переоцінки чи збільшення капіталу екологічного підприємництва в рекреаційно-туристичній сфері (вартість послуг/продукції, вартість цінних паперів екологічних підприємств і т.п.). Суб'єкт впливу: держава. Мета: досягнення рівню економічної рентабельності екологічного підприємництва в рекреаційно-туристичній сфері за допомогою створення валоризаційної надбавки до екологічного продукту чи штучного збільшення капіталу екологічних підприємств. Інструменти впливу: індексація; нормативні коефіцієнти до економічних розрахунків; ринок інвестиційних сертифікатів (англ.:mutual fund shares); і т.п. Загрози при застосуванні: можливий розвиток інфляційних процесів; деформація міжгалузевої конкуренції за рахунок зміщення коефіцієнту економічної привабливості; біржові коливання; і т.п.

4) Мінімальної присутності (англ.:minimal presence; франц.: laissez-faire) – обрання державою курсу на роздержавлення (приватизацію) екологічних підприємств в рекреаційно-туристичній сфері та створення режиму «максимального сприяння» для розвитку ринку екологічних послуг за рахунок приватного сектору. Суб'єкт впливу: представники приватного сектору економіки ( в більшій мірі); держава ( в меншій мірі). Мета: повна дерегуляція з боку держави рекреаційно-туристичної сфери та створення передумов для вільного розвитку екологічного підприємництва за ринковими законами. Інструменти впливу: приватизація; дерегуляція (скасування необхідності отримання ліцензій, дозволів, тощо); і т.п. Загрози при застосуванні: зниження якості екологічного продукту за рахунок відсутності інспектування з боку держави; системні порушення правил вільної конкуренції (демпінгування; картельні змови; тощо); повна незахищеність

екологічного підприємництва в рекреаційно-туристичній сфері від економічних коливань (кризи; інфляційні процеси; і т.п.); можливість повного знищення всієї сфери в разі втрати нею економічної привабливості, що призведе до ситуації колапсу; і т.п.

5) Структурної комунітарності (лат.: *structuram communitas*) – формування на базі ординарної чи синтетичної стратифікаційної одиниці групи навколо економічних інтересів з обов'язковим веденням економічної діяльності в розрізі екологічного підприємництва. Суб'єкт впливу: стратифікаційна одиниця. Мета: формування ринкової кон'юнктури в рекреаційно-туристичній сфері за рахунок ініціативних дій суб'єктів господарювання з послідуочим створенням сталої системи лобювання та захисту власних інтересів. Інструменти впливу: громадські організації (профспілки, тощо); фінансово-промислове групування (консорціуми, концерни, тощо). Загрози при застосуванні: можливість появи депресивних регіонів, що не матимуть груп лобювання; перспективи до монополізації ринку (монопсонізації, олігополізації); нівелювання загальнодержавних інтересів; тощо.

6) Міжнародного екологічного патерналізму (англ.: *international environmental paternalyzm*) – розробка, фінансування та контроль екологічних проектів на території України ініційованих міжнародними організаціями та іноземними державами в межах цільового фінансування. Суб'єкт впливу: міжнародні організації, іноземні держави. Мета: реалізація широкого кола цілей від колективної екологічної безпеки та ліквідації наслідків екологічних катастроф до формування прецеденту власної присутності на ринку екологічного підприємництва в рекреаційно-туристичній сфері України. Інструменти впливу: міжнародні екологічні програми; екологічні гранти; надання позик на екологічні проекти; і т.п. Загрози при застосуванні: складність адміністрування; можливість міжнародних колізійних ситуацій; постійна загроза відмови в фінансуванні; тощо.

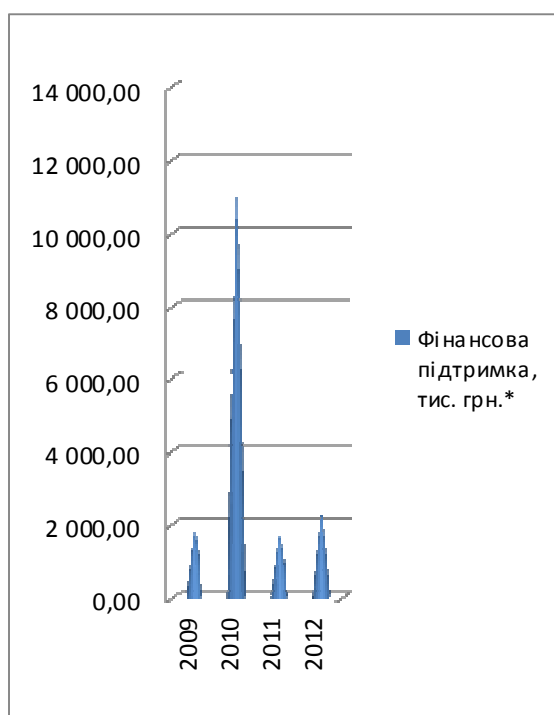


Рис.1 - Фінансова підтримка розвитку туризму в Україні в період з 2009 по 2012 роки.

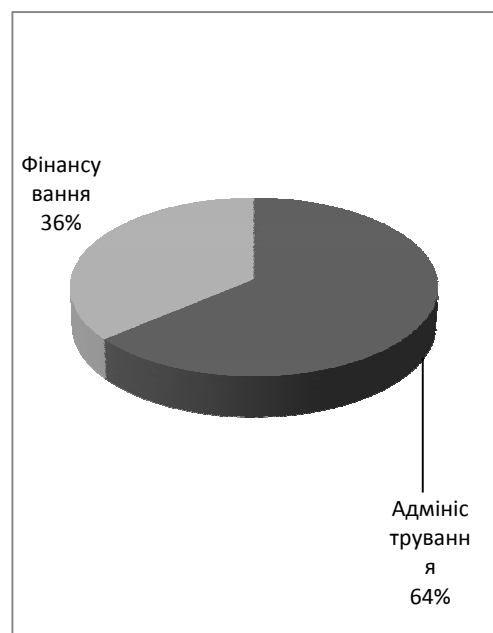


Рис.2 – Показники витрат на фінансування туризму у 2012 р.

\* У 2012 році статтю видатків «фінансова підтримка розвитку туризму об'єднали зі статтю видатків «фінансова підтримка створення умов безпеки туристів та розбудови туристичної інфраструктури міжнародних транспортних коридорів та магістралей в Україні».

Аналізуючи показники фінансової підтримки розвитку туризму в період за 2009-2012 роки, можна прийти до висновків, що зазначена сфера фінансується за залишковим принципом [3-6] (рис.1,2). Держава Україна фактично повністю скорочує свою присутність в туристичній сфері, як партнера, залишаючись в ній лише як наглядач. Зазначені висновки повністю підтверджуються діаграмою витрат на адміністрування та фінансування туризму в Україні за 2012 рік, де витрати на адміністрування складають 64% від розміру всього фінансування. Іншими словами держава витрачає 2/3 коштів передбачених на розвиток туризму на заробітню платню чиновників, паливно - мастильні матеріали для службових автомобілів і т.п. Хоча, як зазначають С.К.Харічков та С.Г. Нездоймінов, в країнах з розвинутою туристичною індустрією виділяються значні кошти на просування власного туристичного продукту на міжнародний туристичний ринок, що обумовлено, насамперед, високими вимогами сучасних туристів відносно отримання загальної інформації про країну, яка формує її туристичний імідж і виділяє між інших країн. Оскільки в результаті країна має: доволі швидке повернення витрачених коштів, зростання національного доходу, покращення зайнятості населення, збільшення надходження валюти та поліпшення платіжного балансу і екологізації інфраструктури країни [6].

**Висновки:** Найбільш оптимальною формою для побудови системи інституціональних підходів розвитку екологічного підприємництва в рекреаційно-туристичній сфері є, у зв'язку з її поліфакторністю, форма комплексної конвергенції. Динамічність структури економічних відносин обумовлює необхідність формування одразу декількох інституціональних підходів розвитку екологічного підприємництва, що дозволить застосовувати в залежності від наявної еколого-економічної ситуації найбільш прийнятний інституціональний підхід, що створюватиме умови до максимізації коефіцієнту корисної дії. Зловживання будь-яким з інституціональних підходів неминуче призведе до негативних змін в об'єкті впливу, що носитимуть тимчасовий чи незворотний характер.

### Список літератури

1. *Корытцев М.А.* Институциональный экономический анализ в контексте методологической проблематики экономической науки//Экономический вестник Ростовского государственного университета. – Т. № 6. - № 3. – С. 95 – 108.
2. *Носова О.В.* Институциональні підходи до дослідження перехідної економіки//Економічна теорія. – 2006. - № 2. – С. 25 – 36.
3. *Закон України* “Про Державний бюджет України на 2012 р.” від 22.12.2011 р.// № 244 Офіційний вісник України від 30.12.2011р., № 100, / Спеціальний випуск № 100/1 /, стор. 9, стаття 3696, код акту 59804/2011.
4. *Закон України* “Про Державний бюджет України на 2011 р.” від 23.12.2010 р.//Офіційний вісник України від 31.12.2010 р., / № 99/1 /, стор. 9, стаття 3541, код акту 54194/2010.

5. Закон України “Про Державний бюджет України на 2010 р.” від 27.04.2010 р.//Офіційний вісник України від 11.05.2010 р., № 32, стор. 10, стаття 1155, код акту 50889/2010.

6. Закон України “Про Державний бюджет України на 2009 р.” від 26.12.2008 р.//Відомості Верховної Ради України від 15.05.2009 р., № 20, / № 21-22 /, стор. 680, стаття 269.

7. Харічков С.К., Нездоймінов С.Г. Туризм як ключовий сектор стратегії “зеленої економіки”//Економіка Крима. - 2012. - №1 (38). - С. 52-56.

### **Институциональные подходы развития экологического предпринимательства в рекреационно-туристической сфере.**

**Полянничко Е.В.**

*Определено содержание институциональных подходов развития экологического предпринимательства. Выполнена систематизация существующих доктринальных форм институциональных подходов развития. Рассмотрены институциональные подходы развития экологического предпринимательства в рекреационно-туристической сфере.*

**Ключевые слова:** экологическое предпринимательство, институциональный подход, рекреационно-туристическая сфера, туризм, рекреация.

### **Institutional approaches to the development of environmental entrepreneurship in the recreational and touristic sphere.**

**Polyanichko O.V.**

*The meaning of the institutional approaches to the development of environmental entrepreneurship is determined. The systematization of existing scientific forms of institutional approaches to the development is given. The institutional approaches to the development of environmental entrepreneurship in the recreational and touristic sphere are considered.*

**Key words:** environmental entrepreneurship, institutional approach, recreational and touristic sphere, tourism, recreation.



УДК 663.21

Полищук Т.Н., ст. препод.

Одесский государственный экологический университет

## ОБ ОСНОВАХ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ВИН ВЫСШЕЙ КАТЕГОРИИ КАЧЕСТВА В УКРАИНЕ

*В статье рассмотрены подходы к организации производства вин высшей категории качества. Определены направления организации производства вин. Разработана система требований к качеству вин, в частности положение о новой классификации вин.*

**Ключевые слова:** производство вин контролируемых наименований по происхождению (КНП), виноградарство, виноделие, ампелозоологические карты, микрозоны качественного виноделия, геоинформационные системы.

**Введение.** Производство вин контролируемых наименований по происхождению (КНП) в Украине до настоящего времени не освоено. Изучение зарубежного опыта и экологических условий зон промышленного виноградарства позволило предложить возможную организацию производства вин КНП и выделение микрозон качественного виноделия.

**Методы исследования.** Методика исследований обеспечивает решение следующих задач: определение подходов к организации производства вин КНП; обоснование актуальности организации производства вин высшей категории качества. Недостаточно исследованным остается вопрос влияния маркетинговой деятельности на развитие производства качественных вин.

Методологической основой исследований являются научные труды в области управления виноградарством и виноделием.

**Результаты исследования и их анализ.** Система производства вин КНП основывается на тесной взаимосвязи географического положения площади виноградника, сортового состава, системы возделывания культуры и особенностей производства вин [3]. Идея создания вин КНП – это не только организация контроля со стороны государства, но и забота о качестве производимых в Украине вин, что позволит отечественной продукции выйти на мировой рынок. Эта система позволяет гарантировать производство вина в конкретной зоне по конкретной технологии из винограда высокого качества определенного сорта или сортов.

Основными направлениями организации производства вин КНП являются:

- выделение зон (микрозон) выращивания винограда высокого качества;
- определение оптимального сортового состава для этих зон.

Для выделения новых микрозон качественного виноделия необходимо провести изучение хозяйств и состав их насаждений, почвенно-климатических и экологических факторов, состояния насаждений винограда и технико-экономическое состояние перерабатывающих предприятий [5].

С целью оптимизации проводимых работ по выделению микрозон качественного виноделия и принятию рациональных управленческих решений по закладке молодых виноградников нами разработана концептуальная методика производства вин КНП.

### 1. Условия производства вин КНП

Виноградарство – традиционная отрасль сельскохозяйственного производства южных областей Украины, АР Крым и Закарпатья. Роль и место его в агропромышленном комплексе определяется наличием благоприятных эколого-экономических условий (климатических и почвенных условий, высоким спросом на

винопродукцию и виноград в свежем виде на внутреннем рынке и возможностями экспорта). От уровня развития виноградарства и его промышленной переработки во многом зависят состояние сельхозпредприятий южного региона, удовлетворение потребностей в столовом винограде и высококачественных украинских винах [4]

Украина располагает уникальными микрозонами (Южный берег Крыма, Бериславский район Херсонской обл., Очаковский район Николаевской обл., Закарпатье, Заднестровье Одесской области и др.) для получения вин КНП на базе традиционных марочных вин (их более 60). Но продвижение в производство такой категории вин происходит медленно. Пионерами здесь являются компании «Массандра» и «Коблево». Опыт Франции в выпуске вин контролируемых наименований по месту происхождения более 100 лет [2].

Промышленным выращиванием винограда занимается около 350 коллективных и госпредприятий, где сосредоточено 90,5 тыс. га виноградников. Следует отметить, что виноградарство начинает развиваться и в фермерских хозяйствах, винодельческую промышленность представляют около 160 предприятий, которые осуществляют переработку винограда, производство и выпуск вин, шампанского и коньяков [2].

Приоритет украинских коньяков на внутреннем рынке поддерживает одно из крупнейших предприятий Украины – Одесский коньячный завод под торговой маркой «Шустов», который контролирует около 70% продаж коньяков на рынке Украины. Благодаря его умелой инвестиционной политике и стратегическому маркетингу предприятие смогло за короткий период создать свою сырьевую базу – заложить около 1000 га виноградников, наладить выпуск посадочного материала, модернизировать материально-техническую базу, создать фирменную торговлю [4].

Украина имеет уникальные экологические условия для производства вин КНП, однако законодательная база и научно-обоснованные рекомендации, позволяющие организовать их производство, отсутствуют [5].

Нами разработана система требований к качеству вин для присвоения им категории КНП:

- Вина контролируемых наименований по происхождению должны отличаться высококачественными характеристиками, сформированными природными факторами (климат, рельеф, почва, сорт винограда) и антропогенным воздействием (системы агротехники и технологии переработки). Эти вина из винограда строго определенного сорта или сортов, собранного в зоне с определенными экологическими условиями, границы которых четко обозначены.

- Вина контролируемых наименований по происхождению этикетируются специфической этикеткой, отображающей географическое расположение плантации и характерные черты хозяйства, где производится данный продукт.

- Производство, выдержка, обработка и розлив вин с КНП должно осуществляться в строго определенной географической местности произрастания винограда. В исключительных случаях допускается производство этой категории вин вне зоны произрастания сырья, при этом на этикетке обязательно указывается наряду с географической местностью выращивания винограда, также и название предприятия-изготовителя и розлива готового вина.

- Вина с КНП реализуются исключительно расфасованными в бутылки на предприятии-изготовителе. Во всех случаях должно гарантироваться качество продукта и осуществляться хорошая реклама.

- Запрещается использовать наименования по происхождению для вин, полученных полностью или частично из гибридных сортов прямых производителей. При производстве натуральных вин не допускается использование этилового спирта, сахарозы, виноградных концентратов, ароматизирующих веществ и искусственных

красителей. Разрешается применение этилового спирта, виноградных концентратов и других компонентов при производстве вин специальных типов, что обусловлено технологией.

*В свете интеграции Украины в ЕС, основываясь на стандартах ведущих винодельческих стран Европы, нами разработано положение о принципиально новой классификации вин.*

В зависимости от качества предусматривается следующая классификация высококачественных вин с КНП:

- КНП - вина этой категории находятся под контролем правительства. Чтобы получить контролируемое наименование вино должно соответствовать ряду четких требований по местности производства, сортам винограда, содержанию алкоголя, объему производства, способу обработки, урожайности насаждений и т.д., разработанных конкретно для данного района;

- в основе производства вин КНП лежит географический принцип. Виноград должен быть выращен, произведен и разлит в бутылки в регионе или в хозяйстве (индивидуальном винодельческом хозяйстве), которые указаны на этикетке;

- вина КНП могут быть областными, региональными, районными и местными. Некоторые вина можно получить только из одного сорта винограда, без примеси какого-либо другого сорта;

- существуют также ряд ограничений на объем производимого вина с единицы площади насаждений, что достигается за счет определенных агротехнических приемов возделывания винограда, а также изготовления и хранения вина во время его формирования. Это достигается за счет уплотненной посадки, подрезки, минимального удобрения почвы;

- местные вина – разрешено изготавливать из большого количества определенных сортов винограда строго установленной местности;

- столовые вина – самая низкая категория в классификации. Это недорогие вина повседневного употребления, не имеющие отчетливых особенностей.

## **2. Организационно-методологические основы выделения зон качественного виноградарства для производства вин КНП**

Украина располагает огромными возможностями для увеличения производства конкурентоспособной винопродукции за счет оптимального использования природных ресурсов и потенциальных возможностей сортов.

Сорта винограда по-разному реагируют на природные условия в зоне возделывания винограда.

Ампелоэкологические ресурсы – это совокупность факторов внешней среды в их взаимосвязи и взаимозависимости, комплексное взаимодействие которых с определенным сортом винограда создает благоприятные условия его эффективного возделывания. Важнейшие экологические факторы винограда объединяют в 3 группы: почвенный покров, рельеф местности, климат.

Система производства вин КНП основывается на тесной взаимосвязи географического положения площади виноградника, сортового состава, системы возделывания культуры и особенности производства вин. Идея создания вин КНП – это не только организация контроля со стороны государства, но и забота о качестве производимых в Украине вин, что позволит отечественной продукции выйти на мировой рынок. Эта система позволяет гарантировать производство вина в конкретной зоне по конкретной технологии из винограда высокого качества определенного сорта или сортов [3]

Наряду с выполнением экологических исследований большая роль в производстве вин КНП отводится высокому технологическому обеспечению процесса переработки винограда.

В Украине имеется достаточный опыт размещения виноградников в традиционных природно-экономических зонах возделывания винограда [3]. Однако необходимо отметить, что отсутствие комплексного подхода и ошибки при проектировании приводят к возникновению ряда отрицательных явлений:

- снижение урожайности;
- получение некондиционной продукции;
- гибель насаждений;
- сокращение долговечности плантаций.

Все вышеперечисленные явления обусловлены размещением виноградников в неблагоприятных экологических условиях, неэффективным использованием природно-ресурсного потенциала, что наносит большой ущерб отрасли.

Необходимо повышать эффективность использования природно-ресурсного потенциала. Основные положения методологических подходов к решению вопросов рационального размещения виноградников в Украине:

1. Территория, на которой произрастает виноград является комплексной экологической системой. Основные компоненты которой – важнейшие экологические факторы произрастания винограда: рельеф, микроклимат и почвенный покров.

2. Количественное изучение пространственной изменчивости каждого из этих факторов и их картографирование.

3. Выявление взаимосвязи факторов, рассмотрение их как ампелобиоценоза. Принцип системного подхода требует применения единых методов исследований:

- каждый элементарный фактор изучается количественно;
- градуировка показателей осуществляется на основе экологической биоиндексации сортов винограда;
- соизмеримость экологических и производственных выделов.

4. Составление комплексных ампелозоологических карт разного масштаба для принятия управленческих решений на разных уровнях хозяйственной деятельности (хозяйства, административного района, природно-экологической зоны, страны в целом).

5. Проведение эколого-экономического анализа территории, результаты которого являются основой проектирования закладки виноградников и обеспечения наиболее эффективного использования природно-ресурсного потенциала страны.

Выделение микрзон качественного виноградарства и виноделия и освоение выпуска вин КНП потребует инвестиций для освоения производства и сбыта вин.

На наш взгляд целесообразно в корне изменить государственную политику касающуюся развития виноградарства. Она должна быть направлена на увеличение выпуска высококачественной конкурентоспособной продукции, рациональное использование благоприятных природно-климатических ресурсов и окупаемость вложенного капитала. Исходя из этой концепции, государственные вложения из централизованного фонда должны использоваться целенаправленно для закладки виноградников только в зонах (микрзонах) качественного виноградарства и виноделия для производства вин КНП. Кроме того, за счет этих средств целесообразно восстановить питомниковедческую базу путем авансирования выращивания саженцев необходимых сортов винограда для той или иной зоны (микрзоны) в соответствии с государственным заказом [1].

### 3. Выявление новых микрозон

Одной из основных особенностей производства вин КНП является строгое ограничение ареала произрастания винограда с определенными экологическими условиями. Исходя из этого, исследования по изучению и выделению зон качественного виноделия имеют ряд характерных особенностей [5].

1. Исследования начинаются с экспедиционного обследования территорий сельскохозяйственного пользования с целью установления изменяющихся в пространстве ампелоэкологических явлений и их закономерностей для решения теоретических и практических проблем виноградарства и виноделия, рационального использования природных ресурсов. Наряду с определением основных экологических факторов проводится оценка состояния насаждений. Начинать экспедиционные исследования необходимо с зон традиционно производящих высококачественные марки вин. По результатам исследований дается описание состояния виноградников и составляется общая характеристика экологических условий.

2. Проводится оценка количественного потенциала каждого фактора окружающей среды, устанавливаются количественные показатели оптимальной экологической ниши.

3. Определяется вероятность получения высококачественного урожая винограда соответствующего требованиям производства вин КНП. Уровень вероятности получения качественного урожая по годам должен быть не менее 50%. Детально изучаются потенциальные возможности экологических микрозон, их вариабельность по годам и запасные пределы для формирования качественного урожая.

4. Обязательным условием для выделения зон качественного виноделия является составление картографического материала исследуемой территории и четкое определение границ выделенных перспективных микрозон для получения высококачественного сырья.

На международном рынке цены на вина КНП в 50–100 раз выше чем на ординарные вина. По некоторым сортам винограда (Каберне Совиньон, Траминер розовый, Пино, Совиньон, Шардоне, Саперави, Рислинг рейнский, Ркацетели и др.) выделяются в Украине природно-виноградарские районы, где не менее 5 лет получают виноград и винопродукцию высокого качества [3].

**Выводы.** На основе вышеизложенного становится понятной ориентация на выпуск вин КНП, что обеспечит удовлетворение спроса на внутреннем рынке, повышение конкурентоспособности украинских вин и увеличение их экспорта. Для реализации такой стратегии необходимо размещать новые насаждения исключительно в зонах качественного виноделия. В целях повышения качества винопродукции на основе рационального использования природных ресурсов целесообразно размещать новые насаждения в благоприятных почвенно-климатических зонах с учетом особенностей сортов винограда.

Результаты данных исследований представляются в виде тематических и комплексной ампелоэкологических карт:

- ампелоэкологическая карта почвенного покрова;
- ампелоэкологическая карта морозоопасности;
- ампелоэкологическая карта теплообеспеченности;
- ампелоэкологическая карта рельефа;
- ампелоэкологическая карта влагообеспеченности;
- комплексная ампелоэкологическая карта.

Кроме того, проводится эколого-экономический анализ использования выделенных земельных участков. На основании проведенных исследований на комплексной ампелоэкологической карте выбираются наиболее перспективные

екологічні ділянки, що дають високоякісну продукцію і виробляються їх оконтурювання, т.е. визначаються чіткі межі його поширення [5]

Наряду з виконанням екологічних досліджень, велика роль в виробництві вин КНП відводиться високому технологічному забезпеченню процесу переробки винограду.

Таким чином, виділення виноградно-виноделіських центрів виробництва вин КНП є всебічним багатограничним процесом оцінки природних умов виноградного асортименту і технологічних можливостей території.

Реалізація стратегії стійкого розвитку дозволить збільшити щорічні посадки виноградників в 2 рази і довести їх до 7-8 тис га. До 2020 року площі виноградників і виробництво винограду може досягти рівня 80-х років минулого століття. Закладка і вирощування нових виноградників забезпечить створення 140-150 тис. додаткових робочих місць, що значно покращить соціально-економічну ситуацію південних регіонів України [6].

### Список літератури

1. Гладій Н.В. Особливості поглиблення агропромислової інтеграції // Економіка АПК. - 2005. - №12. - С.55-58.
2. Джуприна Ю.І. Вертикальна інтеграція на кооперативних засадах - доцільність і перспективи в сільському господарстві // Економіка АПК. - 2004. - №12. - С.123-126.
3. Подгорная С.В., Суздалева В.И. Зависимость кондиций сырья различных сортов винограда от тепловых ресурсов юга Украины // Виноградарство и виноделие. - К.: «Урожай» - 1984. - №27. - С. 18-25.
4. Сахно Л.А. Удосконалення економічних відносин в інтегрованих агропромислових підприємствах // Економіка АПК. - 2004. - №8. - С.142-146.
5. Спектор Я.С. Ефективність виробництва винограду в різних організаційно-правових формуваннях // Економіка АПК. - 2004. - №7. - С. 77-80.
6. Яценко В.М. Формування і розвиток агропромислової інтеграції в Україні // Економіка АПК - 2004. - №1. - С. 54-60.

#### **Про основи організації виробництва вин вищої категорії якості в Україні.**

**Поліщук Т.М.**

*У статті розглянуто підходи до організації виробництва вин вищої категорії якості. Визначено напрями організації виробництва вин. Розроблена система вимог до якості вин, взагалі положення про нову класифікацію вин.*

**Ключові слова:** виробництво вин контрольованих найменувань за походженням (КНП), виноградарство, виноробство, мікрозони якісного виноробства, геоінформаційні системи.

#### **About foundation of the production organisation of wines name in Ukraine. Polischuk T.**

*The approaches to higher quality wine production are considered in the article. The directions of wine production are defined. The system of the requirements to a wine quality and the regulations of a new wine classification are worked out.*

**Key words:** the production of wines name, controlled originally, winemaking viticulture, microzones of quality winemaking, geographic information systems.

УДК 551.577.23

**Е.Н. Воскресенская**, д.геогр.н., **Е.В. Вышкваркова**, инж.

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь*

## **ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ОСАДКИ И ИХ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ**

*По данным наблюдений суточных сумм осадков на 28 гидрометеостанциях Украины в период с 1951 по 2009 гг. с использованием независимых методов получены ряды экстремальных величин осадков для четырех сезонов и года в целом, оценены их линейные тренды. Проанализировано пространственное распределение климатических изменений рассчитанных характеристик по территории страны для зимы, весны, лета и осени.*

**Ключевые слова:** *суточные суммы осадков, экстремальные события, линейный тренд, пространственное распределение.*

**Введение.** Экстремальные осадки, являясь климатическими феноменами, способны существенно влиять на эффективность деятельности многих секторов экономики стран и регионов. С интенсивными ливнями связана угроза наводнения, эрозии, селей и оползней в горах. Несвоевременные и затяжные дожди вредоносны для урожая. Экстремально малые суммы осадков приводят к засухе, опасности лесных пожаров, обмелению рек, трудностям для судоходства и водоснабжения, потерям урожая. Интенсивные снегопады парализуют транспорт, вызывают повреждения деревьев, ЛЭП, зданий под снеговой нагрузкой, сход снежных лавин в горах, а при выпадении в обычно бесснежных районах или в теплое время года приносят ущерб сельскому хозяйству.

В условиях современных изменений климата и его будущих неопределенностей, интерес к изучению тенденций экстремальных осадков в последние десятилетия постоянно возрастает [1]. В отчете IPCC [2] указывается на увеличение количества осадков за период 1900–2009 гг. севернее 30° широты вследствие глобального потепления. Однако в литературе встречается ряд публикаций по региональным изменениям климата с противоречивыми выводами. Современные исследования в данной области, основанные на использовании разных методов и различных типов данных, показывают, что в оценках величин экстремальных осадков имеются существенные неопределенности, не позволяющие эффективно изучать как климатические характеристики экстремальных осадков, так и связанные с ними последствия. В одних работах, например, [3] изучение региональных трендов количества осадков показало значимое увеличение осадков в восточной части Северной и Южной Америки, на севере Европы, в северной и центральной частях Азии. При этом увеличение засушливости наблюдалось в Сахели, Средиземноморском бассейне, части южной Азии. В других, например [4], не выявлено увеличения относительного вклада интенсивных осадков на территории бывшего СССР и Китая. В то же время, в [5] обнаружено, что тренды количества влажных дней для 90-процентильного уровня за период 1961–1990 имеют там разные знаки, тогда как в [6] показано общее увеличение числа экстремальных осадков в Европе в период 1946–1999. Аналогичные результаты были получены в ходе глобальных и региональных исследований [7]. Такие выводы получили подтверждение в 4-м оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата [2], где утверждается, что повторяемость случаев выпадения экстремальных осадков за последние 50 лет в Европе в целом растет. Для территории Украины подобные оценки выполнялись лишь для отдельных местностей. Однако изучение экстремальных осадков остается непростой задачей.

Метод, основанный на использовании индексов экстремальности [8, 9 и др.], наиболее распространен для выделения экстремальных осадков. Для этого выбираются пороговые значения, обычно абсолютные или относительные величины. Другим, часто применяемым методом, является ранжирование интенсивности осадков. Однако, применение разных подходов к выделению экстремальных событий порой вызывает дискуссии в ходе региональных исследований. В то же время, получение количественных характеристик для анализа повторяемости экстремальных климатических явлений остается сложной задачей, поскольку частота таких событий невелика и использование стандартных статистических методов затруднительно. В настоящей работе с использованием независимых методов выделены экстремальные значения осадков. На этой основе проведен анализ пространственного распределения их линейных трендов по территории Украины.

**Данные и методика анализа.** В работе использовались данные суточных сумм осадков по результатам наблюдений за период с конца XIX по начало XXI вв. на следующих 28 гидрометеорологических станциях Украины: Ай-Петри, Аскания Нова, Винница, Генчеськ, Дебальцево, Днепропетровск, Донецк, Житомир, Ивано-Франковск, Измаил, Керчь, Киев, Кировоград, Лубны, Луганск, Львов, Одесса, Полтава, Севастополь, Симферополь, Сумы, Тернополь, Ужгород, Умань, Феодосия, Харьков, Черновцы, Шепетовка.

Указанные массивы сформированы из двух источников: база данных the European Climate Assessment (ECA) & Dataset [<http://eca.knmi.nl/dailydata/index.php>] и база данных National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [<http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/search>]. Проверка качества полученных массивов выполнялось с привлечением данных наблюдений гидрометеослужбы Украины, которая показала однородность и тесную корреляционную связь для периода с 1951 по 2009 гг., наиболее полно обеспеченного качественными данными по всем станциям. В результате, именно этот период и рассматривался далее в ходе исследования.

Сложность анализа суточных осадков заключается в том, что их распределение не соответствует нормальному закону распределения. Оно может быть аппроксимировано Гамма-распределением. На рис. 1 приведена в качестве примера гистограмма распределения суточных осадков (для дней с суммами осадков больше 0,1 мм) для зимнего сезона для станции Ай-Петри (1951–2005 гг.). Коэффициенты асимметрии и эксцесса равны 4,76 и 25,96 соответственно.

Для изучения экстремальных осадков в данной работе применены методы абсолютного и относительного порогового значения. Оценка изменений во времени

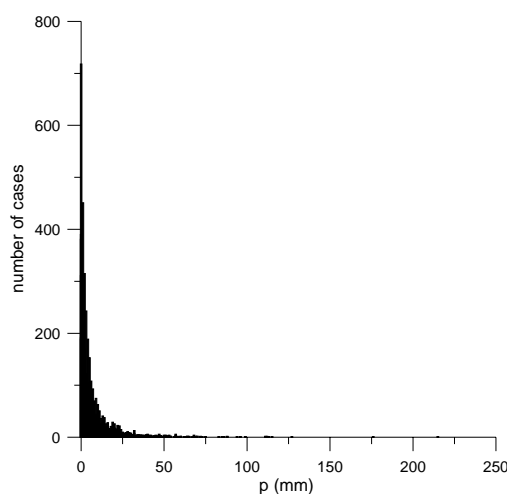


Рис. 1 – Гистограмма распределения суточных осадков для зимнего сезона, станция Ай-Петри (1951–2005 гг.)



неравномерности экстремальных осадков проводилась на основе рассчитанных линейных трендов. Рассмотрим последовательно результаты применения указанных методов и их анализа.

**Результаты.** Анализ экстремальных осадков выполнялся с привлечением двух независимых методов. Первый из них – метод абсолютного порогового значения (индекс R20mm, R30mm). Смысл метода заключается в следующем. Выбирается некоторое значение суммы осадков (в мм) за сутки, например, 30 мм, которое считается пороговым. При этом все случаи суточных сумм осадков, превышающие указанное значение, принимаются за экстремальные.

Проблема этого метода состоит в определении порогового значения для изучаемого региона. Дело в том, что данный метод хорошо подходит для анализа осадков в одной точке или на небольшой территории. Однако при рассмотрении значительных территорий, одно и то же пороговое значение может быть нерепрезентативным для разных ее областей. Поэтому неправильно применять один и тот же критерий к районам, находящимся в неодинаковых климатических областях, например, засушливого и морского климата.

В настоящей работе первоначально использовался порог 30 мм за сутки, что было применено в соответствии с рекомендацией Гидрометслужбы Украины. Однако для некоторых станций, особенно в зимний период, это значение оказалось слишком

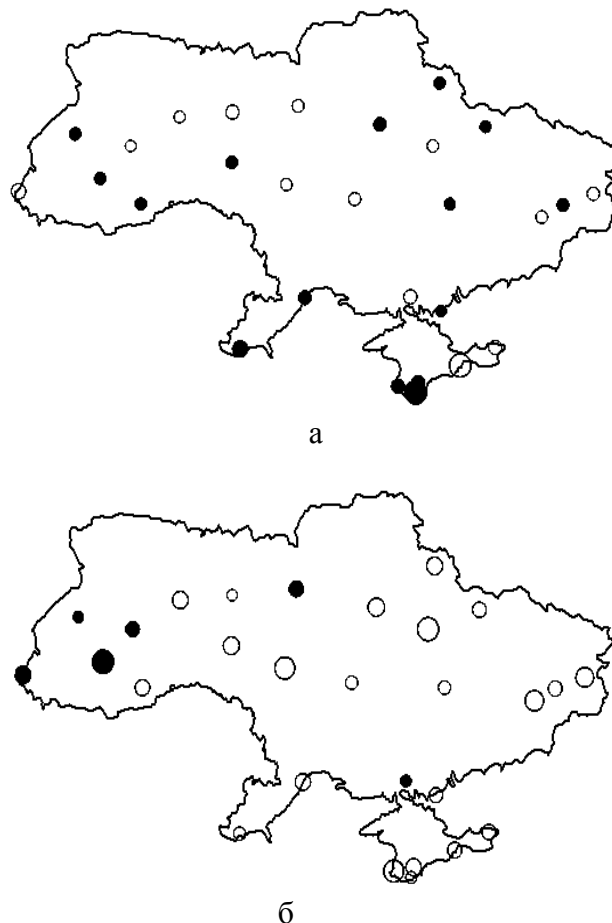


Рис. 2 – Пространственное распределение знаков линейных трендов индекса R20mm для зимнего (а) и летнего (б) сезонов. Черные круги – отрицательный, белые – положительный (величина кругов пропорциональна величине тренда)

большим. Поэтому в ходе использования первоначально принятого порога экстремальности  $R30\text{mm}$ , тренды повторяемости дней с интенсивными осадками для зимнего сезона не рассчитывались, поскольку предварительный анализ количества дней с экстремальными осадками показал, что за исследуемый период на многих станциях было отмечено всего лишь один-два таких случая. В летний же сезон количество таких случаев было вполне достаточным для оценки линейных трендов. В итоге получено, что пространственное распределение линейных трендов в анализируемый период было следующим. Отрицательные тренды характерны для западной части страны и юга Украины, особенно ее приморских регионов, а также для отдельных областей в северной части страны, в частности, станций Киева и Житомира. На остальной территории рассчитанные тренды имеют положительный знак, что говорит об учащении экстремальных ситуаций с осадками.

Далее по указанным выше причинам в качестве порогового использовалось значение  $20\text{ мм}$ , которое было принято согласно соответствующей рекомендации группы экспертов по определению изменений климата CLIVAR/JCOMM.

Применение для анализа в качестве пороговой – величины индекса  $R20\text{mm}$  показало такую картину (рис. 2). В зимний сезон положительные тренды экстремальных осадков приурочены к районам Донецкого края, восточной части

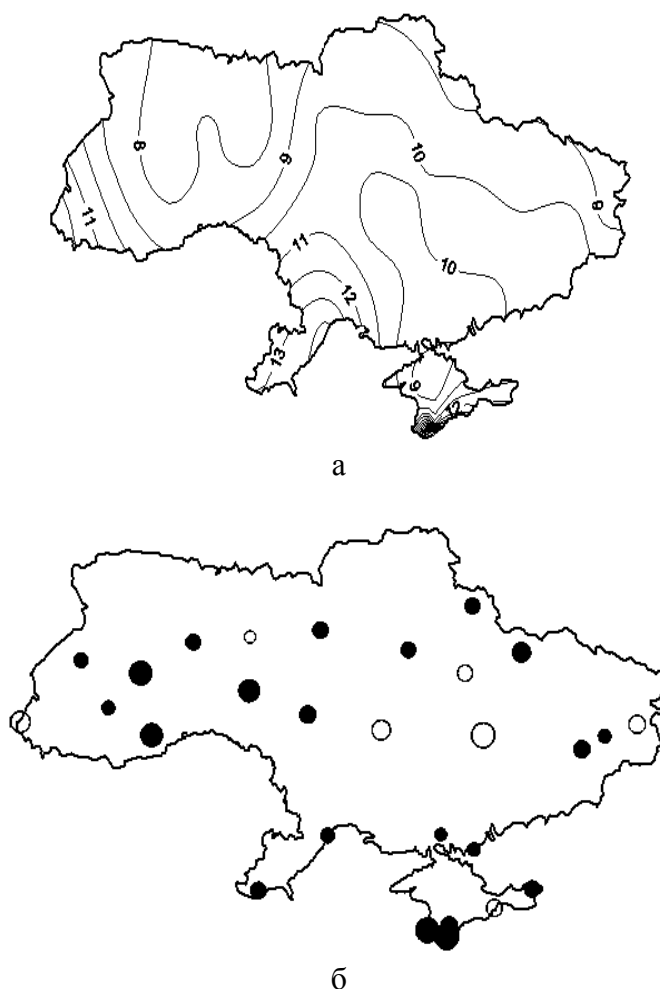


Рис. 3 – Пространственное распределение суточных осадков 95%-ой повторяемости (а) и знаков линейных трендов (б) для зимнего сезона за период 1951–2009 гг. Черные круги – отрицательный, белые – положительный (величина кругов пропорциональна величине тренда)

Крымского полуострова, центральной Украины, а также Закарпатского региона, а для большей оставшейся части Украины – отрицательные. При этом в летний сезон для большей части территории Украины характерно преобладание положительных трендов, отрицательные же значения линейных трендов осадков типичны для таких регионов как западная часть страны, а также для станций Киев и Аскания Нова. Значения положительных трендов в анализируемый период составляют от 0,29 дня/10 лет до 0,001 дня/10 лет, а отрицательных – от –0,33 дня/10 лет до –0,0043 дня/10 лет.

Второй метод основан на использовании относительного порогового значения. В этом случае экстремальными считаются осадки, превышающие некоторое значение, соответствующее определенному проценту повторяемости, получаемому при расчете гистограммы повторяемости осадков. В нашем случае 90, 95 и 99 % (то есть осадки, повторяющиеся раз в 10, 20 и 100 лет). Этот метод более универсален, так как для каждой станции определяется свое пороговое значение, что позволяет учесть рельеф, климатические особенности каждого региона. Однако у такого метода есть и свои недостатки. Дело в том, что одно и то же значение, полученное в процентах соответствует разному абсолютному значению количества осадков на разных станциях.

Рассмотрение распределения суточных сумм осадков 95%-ой повторяемости (так называемые «умеренные» экстремальные явления) для летнего и зимнего сезонов показало следующие результаты.

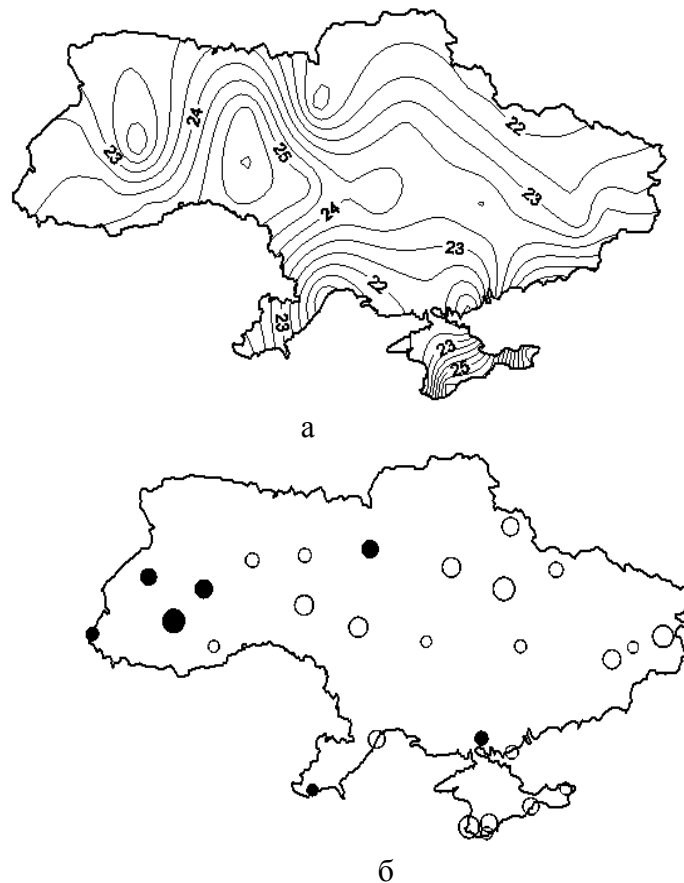


Рис.4 – Пространственное распределение суточных осадков 95%-ой повторяемости (а) и знаков линейных трендов (б) для летнего сезона за период 1951 – 2009 гг. Черные круги – отрицательный, белые – положительный (величина кругов пропорциональна величине тренда)

Зимой максимальное значение характерно для станции Ай-Петри, что показывает рис. 3а. Локальные максимумы расположены на западе, в районе Карпатских гор и на юго-западе страны, включая Одессу. Для лета характерно достаточно равномерное распределение осадков 95%-ной повторяемости. Величина колеблется в пределах 23–24 мм (рис. 4а).

Для определения трендов суточных осадков различной повторяемости подсчитано количество случаев в году превышающие заданные пороги. В зимний период преобладают отрицательные тренды (от  $-0,31$  дня/10 лет до  $-0,026$  дня/10 лет) (рис. 3б), а в летний – положительные (от  $0,25$  дня/10 лет до  $0,0043$  дня/10 лет) (рис. 4б).

Таким образом, используемые методы анализа экстремальных осадков показали похожие результаты, заключающиеся в уменьшении на большей части территории Украины количества случаев экстремальных событий в зимний период и их увеличение в летний.

**Выводы.** В период 1951 – 2009 гг. число событий с экстремальными осадками на большей части территории Украины значимо увеличивалось в летний сезон. Такой результат получен с использованием двух независимых методов.

Линейные тренды экстремальных осадков хорошо согласуются между собой в оценках для зимнего сезона и характеризуются преимущественно отрицательным знаком. Однако, в летний сезон для индексов экстремальных осадков типично преобладание положительных знаков линейных трендов.

#### Список литературы

1. Mariotta A., Struglia M.V., Zeng N., Lau K.M. The hydrological cycle in the Mediterranean region and implications for the water budget of the Mediterranean Sea // *Journal of Climate*. – 2002. – 15. – P. 1674–1690.
2. Solomon S. et al. Technical Summary, in: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, UK, 2007.
3. Hamilton J.P., Whitelaw G.S., Fenech A. Mean annual temperature and total annual precipitation trends at Canadian biosphere reserves // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2001. – 67. – P. 239–275.
4. Karl T.R., Knight R.W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States // *BAMS*. – 1998. – 79. – P. 231 – 241.
5. Klein-Tank A.M.G., Konnen G.P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946–1999 // *J. Climate*. – 2003. – 16. p. 3665–3680.
6. Haylock M.R., Goodess C.M. Interannual variability of European extreme winter rainfall and links with mean large-scale circulation // *Int. J. Climatol.* – 2004. – 24. – P. 759 – 776.
7. Zolina O., Simmer C., Kapala A., Gulev S.K. On the robustness of the estimates of entennial scale variability in heavy precipitation from station data over Europe // *Geophys. Res. Lett.* - 2005. - V. 32. - L14707, doi:10.1029/2005GL023231.
8. Moberg A. et al. Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901 – 2000 // *J. Geophys. Res.* – 2006. - 111. - D22106, doi: 10.1029/2006JD007103.
9. Haylock M.R., Goodess C.M. Interannual variability of European extreme winter rainfall and links with the mean large scale circulation // *Int. J. Climatol.* – 2004. - 24. – P. 759–776.
10. Martin-Vide J. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in Peninsular Spain // *Int. J. Climatol.* – 2004. – 24. – P. 959 – 971.
11. Воскресенская Е.Н., Вышкваркова Е.В. Пространственное распределение индекса концентрации суточных осадков по территории Украины // *Системы контроля окружающей среды /Сб. науч. тр. НАН Украины, МГИ. – Севастополь. – 2011 – Выпуск 15. – С. 235 – 239.*

#### Екстремальні опади і їх кліматичні зміни на території України за даними спостережень

Воскресенська О.М., Вишкваркова О.В.

За даними спостережень добових сум опадів на 28 гідрометеостанція України в період з 1951 по 2009 рр. з використанням незалежних методів отримані ряди екстремальних величин опадів для чотирьох сезонів і року в цілому, оцінені їх лінійні тренди. Проаналізовано просторовий розподіл кліматичних змін розрахованих характеристик по території країни для зими, весни, літа і осені.

**Ключові слова:** добові суми опадів, екстремальні події, лінійний тренд, просторовий розподіл.

#### Extreme precipitation and their climate change over the Ukraine after the observation data sets

Voskresenskaya E.N., Vyshkvarkova E.V.

On the basis of daily precipitation data sets from 28 hydrometeorological stations of Ukraine the seasonal and yearly extreme value rows are got for 1951 – 2009 using several independent methods. Their linear trends are estimated in this paper. The space distribution of climate change of extreme precipitation frequency over the Ukraine in winter, spring, summer and autumn is analyzed in the paper.

**Keywords:** daily precipitation, extreme events, linear trends, space distribution.

## **ПРО ЗВ'ЯЗОК СЕРЕДНЬОГО РІЧНОГО СТОКУ Р. ПІВДЕННИЙ БУГ З ПОСУХАМИ В ПЕРІОД 1951–2010 РР.**

*Вивчається просторово-часовий розподіл характеристик посух з масштабами часу 12, 24 місяці протягом 1951–1980 та 1981–2010 рр. для території України. Визначено, що найбільша кількість тривалих та суворих посух спостерігалась в період глобального потепління. Встановлений тісний взаємозв'язок між часовою мінливістю посух та середнім річним стоком р. Південний Буг на протязі 1951–2010 рр.*

**Ключові слова:** *стандартизований індекс опадів та сумарного випаровування, просторово-часовий розподіл, тривалість і суворість посухи.*

**Вступ.** В останні декілька десятиріч проблема збільшення кількості посушливих явищ стоїть дуже гостро в багатьох країнах світу. Посуха є достатньо складним природним явищем, яке обумовлене довгим і значним дефіцитом опадів при підвищеній температурі повітря, внаслідок чого вичерпуються запаси вологи в ґрунті за рахунок випаровування і транспірації.

Посухи суттєво впливають на оточуюче природне середовище, екосистеми та різні економічні й соціальні сфери діяльності людини, включаючи сільське господарство, міське водозабезпечення та цілий комплекс галузей промисловості.

В залежності від умов формування та тривалості група вчених Американського метеорологічного товариства виділили чотири типи посух: метеорологічна, сільськогосподарська, гідрологічна, соціально-економічна посуха. Метеорологічна посуха являється результатом дефіциту опадів на певній території за певний період часу. Сільськогосподарська посуха (або агрономічна), за звичай, пов'язана з періодами зниження сумарного дефіциту вологості ґрунту з наступним зменшенням врожаю без особливого впливу на ресурси поверхневих вод. Зниження вологості ґрунту обумовлюються кількома факторами, оскільки потреби рослин у водозабезпеченні залежать від переважаючих погодних умов, біологічних особливостей певної рослини і стадії росту, та фізичних й біологічних властивостей ґрунту. Гідрологічна посуха пов'язана з періодами дефіциту ресурсів поверхневих і підземних вод, тобто дефіцитом річкового стоку вказаної гідрологічної системи. Як окремий вид посухи, виділяють також соціально-економічну посуху, яка пов'язана з неможливістю систем водних ресурсів забезпечувати потреби у воді всі галузі економіки, що є результатом дефіциту водозабезпечення, викликаного погодними умовами [6]. При цьому різним типам посух відповідають визначені часові масштаби. Під масштабом часу розуміють період, протягом якого відбувалось осереднення даних температури й опадів і фіксувалось накопичення дефіциту вологи.

**Постановка проблеми.** Одним із головних факторів збільшення кількості посух, їх тривалості та інтенсивності, більшість вчених вважають зміни клімату, які спостерігаються в останні декілька десятиріч, що підтверджують результати дослідження Міжурядової групи експертів по змінам клімату [1]. Але слід зазначити, що збільшення температури повітря в 20 сторіччі відбувалося у два періоди – в 1910–1940-х роках (0,35 °C), і більш сильно, починаючи з кінця 1970-их до теперішнього часу (0,55 °C). Таким чином, значний інтерес представляє дослідження просторово-часової мінливості різних характеристик посух в умовах глобальних змін клімату. Також в даній статті зроблена спроба виявлення зв'язку між змінами просторово-часового розподілу посух з масштабами часу 12, 24 місяці, що відповідають гідрологічним

посухам, та часового розподілу середнього річного стоку однієї з головних річок України – р. Південний Буг. При цьому головним інструментом дослідження являється нещодавно розроблений індекс посухи – стандартизований індекс опадів та сумарного випаровування (SPEI), оскільки саме цей індекс при обчисленні періодів посух враховує не тільки дані температури, а й інші метеорологічні, гідрологічні та агрометеорологічні величини і параметри [8].

**Мета дослідження.** Визначення просторово-часового розподілу основних характеристик посух та встановлення зв'язку посух з гідрологічним режимом р. Південний Буг в умовах глобальних змін клімату.

**Матеріали та методи дослідження.** Для дослідження просторового та часового розподілу кількості, тривалості та суворості різних категорій посух використовувався багатомасштабний індекс посухи – стандартизований індекс опадів та сумарного випаровування SPEI. Індекс SPEI сформовано на основі стандартизованого індексу опадів (SPI) з залученням потенціального сумарного випаровування [7], що дозволило скомбінувати опади та температуру. Процедура визначення SPEI базується на обчисленні стандартизованого індексу опадів. Але, SPI розраховується за середньомісячними значеннями опадів, а SPEI використовує середньомісячні різниці між опадами та потенціальним сумарним випаровуванням. Останнє являє собою простий кліматичний баланс вологи для різних масштабів часу [5].

Середнє значення SPEI дорівнює нулю, а середньоквадратичне відхилення – одиниці. Цей індекс є стандартизованою величиною і може бути порівняний з аналогічними величинами в інших пунктах та за інший проміжок часу. Категорії посух для різних величин SPEI визначені у табл. 1.

Таблиця 1 – Критерії посухи за стандартизованим індексом опадів та сумарного випаровування

Значення SPEI	Категорія посухи
$-0,99 \leq \text{SPEI} < 0$	Посушливі умови
$-1,49 \leq \text{SPEI} < -1$	Помірна посуха
$-1,99 \leq \text{SPEI} < -1,5$	Інтенсивна посуха
$\text{SPEI} \leq -2$	Екстремальна посуха

Після розрахунку індексу SPEI можна додатково визначити деякі характеристики посух, а саме тривалість, суворість та інтенсивність. Найчастіше для визначення цих характеристик застосовується деяке порогове значення, яке може бути як сталою величиною, так і змінюватися у часі, а до інших значень застосовується поняття «викидів». Викид визначається як частина часового ряду деякого індексу посухи  $X_t$ , в якій усі значення або нижче, або вище вибраного порогового значення  $X_0$ ; відповідно ця частина називається або негативним викидом, або позитивним викидом. На рис. 1 показано певний індекс посухи, позначений  $X_t$ , який неодноразово перетинається пороговим значенням  $X_0$ .

Як можна побачити з рис. 1, посуха може бути визначена такими головними характеристиками [2]:

а) дата виникнення посухи  $t_i$  – початок періоду дефіциту вологи, який вказує на початок посухи;

б) дата закінчення посухи  $t_e$  – дата, коли дефіцит вологи стає неістотним і умови для посухи більше не існують;

в) тривалість посухи  $D_d$ , яка обчислюється у роках, місяцях або тижнях, протягом яких індекс посухи постійно нижче порогового значення. Інакше кажучи, це період

часу між датами виникнення та закінчення посухи;

г) суворість посухи  $S_d$ , яка характеризує накопичений індекс посухи нижче порогового значення;

д) інтенсивність посухи  $I_d$ , яка є середньою величиною індексу посухи нижче порогового значення і розраховується як суворість посухи поділена на її тривалість.

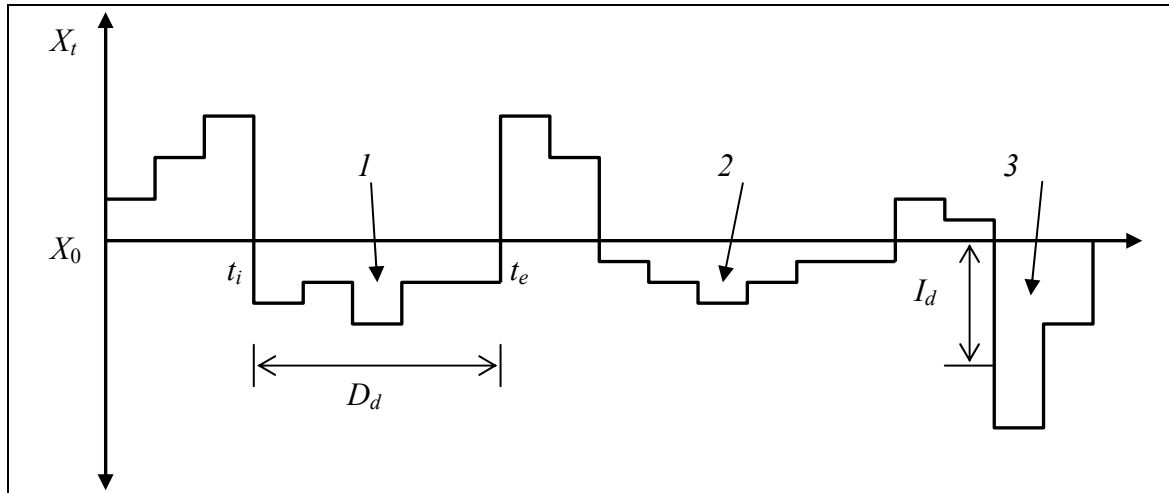


Рис. 1 – Характеристики посухи для певного порогового значення  
(1 – найсуворіша, 2 – найтриваліша, 3 – найінтенсивніша посуха)

З усіх вказаних характеристик в даній роботі для території України була вивчена просторово-часова мінливість кількості, тривалості та суворості посух з масштабами часу 12 та 24 місяці для всіх категорій посух.

При цьому для розрахунку значень багатомасштабного індексу посухи SPEI використовувались середньомісячні дані температури та опадів. Розраховані індекси посухи SPEI для двох тридцятирічних періодів – 1951–1980 рр. та 1981–2010 рр., що відповідають періодам похолодання та потепління, з масштабами часу 12 та 24 місяці. Дослідження проводились у вузлах регулярної сітки, обмеженої широтами 44,25° та 52,75° півн.ш. і довготами 21,75° та 40,25° сх.д. Для обчислення індексу використовувалась база даних середньомісячної температури повітря та опадів з кроком сітки 0,5° з 1948 року по теперішній час, яка нещодавно розроблена в Національному центрі з прогнозування клімату. Але значення температури цієї бази дещо відрізняються від величин, отриманих з наземних станцій, оскільки набір даних Національного центру з прогнозування клімату використовує комбінацію з двох окремих великих баз даних – Глобальної історичної кліматологічної мережі (GHCN) та Системи моніторингу аномалії клімату (CAMS) [3, 4].

Для вивчення часового розподілу гідрологічного режиму р. Південний Буг та його співставлення з часовою мінливістю посух з масштабом часу 12 та 24 місяці використовувались дані річного стоку 18 гідрологічних станцій, розташованих вздовж русла річки. Треба зазначити, що Південний Буг – це найбільша річка України, яка повністю розташована в межах території країни. Довжина ріки становить 806 км, а площа водозбору – 63700 км<sup>2</sup>. Вона бере початок в Волочиському районі Хмельницької області на Волино-Подільському плато, далі тече по Придніпровській височині, та впадає в Чорне море (рис. 2).

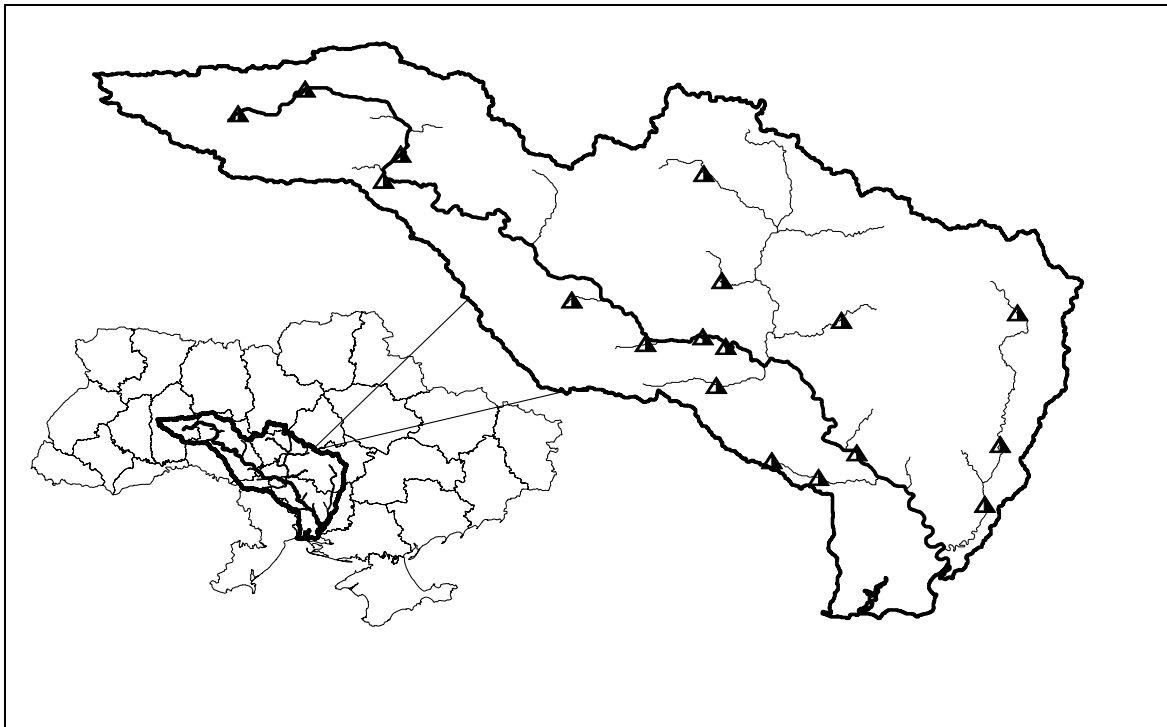


Рис. 2 – Схема басейну р. Південний Буг

**Основні результати.** На першому етапі роботи за результатами обчислення стандартизованого індексу опадів та сумарного випаровування обчислена максимальна кількість, тривалість і суворість посух ( $SPEI \leq -1,0$ ) та посух, що відповідають критеріям помірних, інтенсивних та екстремальних, з масштабами часу 12 і 24 місяці (табл.1).

В якості прикладу, на рис. 3 представлений розподіл загального числа посух з масштабом часу 12 місяців окремо для кожного періоду дослідження. Аналізуючи просторово-часову мінливість посух, можна відзначити, що в період 1951–1980 рр. як для масштабу часу 12 місяців, так і для 24-часового масштабу, осередки максимального числа посух (понад 18) розташовувались над окремими районами заходу та сходу України, та поблизу східного узбережжя Чорного моря. При цьому на більшій частині території країни в цей час фіксувалось від 9 до 15 посух за тридцятиріччя. Абсолютно протилежна картина спостерігається в період 1981–2010 рр., оскільки саме в цей період часу реєструвалось значне збільшення кількості посух та поширення їх практично по всій території дослідження. Так, на більшості розглянутої території кількість посух перевищувала 18-21 випадків за 30 років. Значна кількість посух спостерігалась над південно-західним районом України. Саме в межах цієї території розташовується басейн р. Південний Буг, тому локалізація осередків максимальної кількості посух над вказаною територією й стала основною причиною вибору цього водного об'єкту для даного дослідження. Тим часом слід зазначити, що в даний проміжок часу найменше посух спостерігалось над східними та південно-східними районами України.

Подібну просторово-часову мінливість мають посухи, що належать до інших категорій. Відмінність між цими різновидами посух в своїй більшості полягає лише в числі випадків, що спостерігались для першого та другого періодів дослідження. Число помірних посух в період 1951–1980 рр. з масштабом часу 12 місяців не перевищує 15-20 посух, а в період 1981–2010 їх кількість над південно-західними районами країни перевищує 30-35 випадків. В той час для масштабу часу 24 місяці максимальна кількість посух складає 15-18 та 24-27 відповідно періодам дослідження. Для



інтенсивних посух число посух для періоду похолодання складає 9-12, а для періоду глобального потепління – 15-18, при цьому осередки максимумів знаходяться над тими ж територіями, що й в інших різновидах посух.

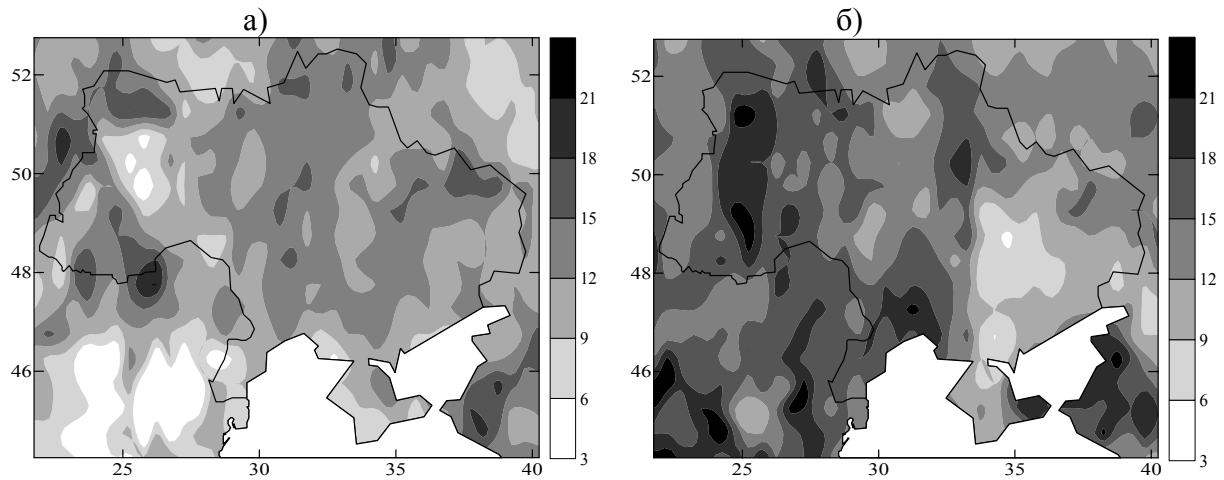


Рис. 3 – Кількість посух ( $SPEI \leq -1$ ) з масштабом часу 12 місяців:  
(а) – з 1951 по 1980 рр.; (б) – з 1981 по 2010 рр.

Останньою категорією, для якої проводились дослідження, являється категорія екстремальних посух. Розподіл цього типу посух подібний попереднім, але кількість їх значно менше, порівняно з помірними та інтенсивними. Так, в період 1951–1980 рр. на більшій частині території України спостерігалось 1-3 екстремальні посухи, лише на сході країни було зафіксовано від 5 до 7 випадків, в той час як над південним заходом екстремальних посух не було взагалі. Проте, протягом 1981–2010 рр. максимальна кількість посух, що перевищувала значення 7 випадків, навпаки, реєструвалась на заході України та над Кримським півостровом, а на сході країни за вказаний тридцятирічний період екстремальних посух не спостерігалось взагалі.

Наступною характеристикою, що досліджувалась в ході виконання даної роботи, стала максимальна тривалість посух за кожен період дослідження. Просторово-часовий розподіл тривалості посух також має свої характерні особливості в залежності від масштабу часу та періоду, що вивчається.

Розглядаючи максимальну тривалість посух, можна відзначити, що протягом 1951–1980 рр. з масштабом часу 12 місяців практично на всій території України вона складала в середньому 10-15 місяців, в той час як для періоду 1980–2010 рр. в крайніх західних, південно-західних та південних районах країни тривалість перевищувала 25-35 місяців. Тривалість посух з масштабом часу 24 місяці для вказаних періодів значно відрізняється від посух з 12-місячним масштабом часу, оскільки, в даному випадку в період похолодання посухи з тривалістю понад 40 місяців спостерігались лише в районі Вінницької та Чернівецької областей, а на решті території країни ця величина не перевищувала 15-20 місяців. В той час в період глобального потепління на більшості території дослідження спостерігались посухи з максимальною тривалістю від 20 до 30 місяців, а на півдні та сході України вона становила 40-45 місяців. А під найбільшим впливом тривалих посух (понад 45-50 місяців) опинились Волинська й Львівська області, та схід Кримського півострову (рис. 4).

Цікавим також виглядає розподіл максимальної тривалості посух, що відповідають критеріям помірних. Так, з масштабом часу 12 місяців тривалість в перший період дослідження становить від 4 до 6 місяців за тридцятиріччя, а в другий –

6-10 місяців. Тривалість для цього різновиду посух з 24-місячним масштабом часу в періоди дослідження збільшується до 6-9 місяців для першого періоду та 9-12 місяців – для другого, при цьому максимуми тривалості мають осередкову структуру по всій території, що вивчається.

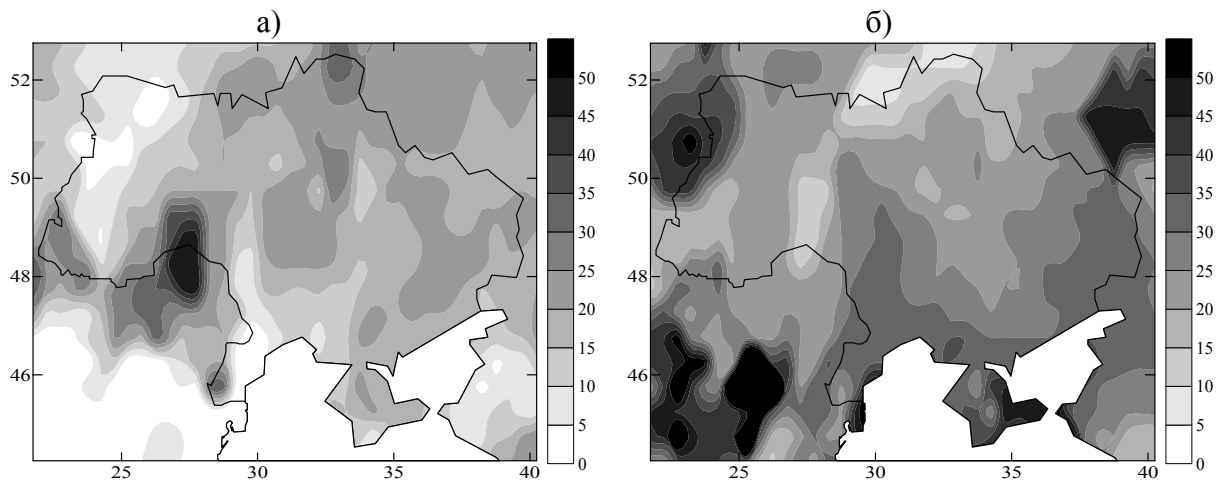


Рис. 4 – Тривалість посух ( $SPEI \leq -1$ ) з масштабом часу 24 місяці:  
(а) – з 1951 по 1980 рр.; (б) – з 1981 по 2010 рр.

Подібна ситуація спостерігається й для інтенсивних посух. Проте тривалість цих посух в період 1951–1980 рр. для масштабу часу 12 місяців становить від 2 до 6 місяців, а для 24-місячного масштабу – від 4 до 8 місяців. В той час в період 1981–2010 рр. тривалість інтенсивних посух становила 3-6 місяців для масштабу 12 місяців, та 6-9, а в районі Запорізької, Одеської області та АР Крим понад 18 місяців, – для 24-місячного масштабу.

Аналіз просторово-часової мінливості екстремальних посух свідчить, що протягом першого періоду дослідження як для масштабу 12 місяців, так і для 24 місяці, найбільші величини максимальної тривалості реєструвались на сході та північному сході України зі значеннями 8-12 та 9-15 місяців відповідно, в той час як на південному заході країни їх тривалість не перевищувала 2 місяці. При цьому протягом другого періоду дослідження, навпаки, максимуми тривалості зосереджені в районі Миколаївської, Одеської та Волинської областей з середньою максимальною величиною тривалості 6-10 та 12-15 місяців для 12 та 24-місячного масштабу відповідно.

Таким чином, можна відзначити, що найбільш тривалі посухи спостерігались протягом 1981–2010 рр. над південно-західними та західними регіонами України, при цьому тривалість усіх категорій посух з масштабом часу 24 місяці значно перевищувала тривалість посух 12-місячного масштабу.

Останньою характеристикою, аналіз якої проводився в даній роботі, являється максимальна суворість посух, розрахована також для всіх категорій посух з 12 та 24-місячним масштабом часу в періоди глобального похолодання та потепління.

В першу чергу треба зауважити, що просторовий розподіл суворості посух для обох періодів та масштабів часу всіх зазначених категорій подібний розподілу по простору характеристик, проаналізованих раніше. Так, осередки максимумів в перший період розташовуються на сході та північному сході України, а в другий – на півдні та заході країни. Тому, в даному випадку, розглянемо більш детально величини максимальних значень суворості.

Отже, в перший досліджуваний період на більшій частині території України для загального числа посух з масштабом часу 12 місяців реєструвалась суворість зі значеннями від -40 до -20, а для масштабу 24 місяці – від -50 до -30 з абсолютним максимумом понад -90 на заході країни. Для масштабу часу значення суворості були дещо вищі для обох періодів, оскільки вони становили -45...-25 та -85...-45 відповідно до масштабу часу. Помірним посухам в період глобального похолодання відповідала суворість близько -9...-3, а в період глобального потепління – -12...-6. При цьому у вказані періоди часу для 24-місячного масштабу величини суворості були майже подібними й коливались від -15 до -5 по всій території дослідження. Подібна ситуація спостерігається й для інтенсивних посух, коли різниця між значеннями суворості для періодів, що аналізуються, була незначною. Проте, якщо для 12-місячного масштабу величина суворості приблизно становить -15...-5, то для 24-місячного в період 1951–1980 рр. вона становить -10...-5. Для періоду 1981–2010 рр. перевищує -15...-10, а на південному сході та Кримському півострові суворість досягає значень близько -40.

Досить цікаві результати розрахунку максимальної суворості отримані для посух, що відповідають критеріям екстремальних. Так, протягом першого періоду для масштабу часу 12 місяців максимуми зі значеннями понад -30 відзначались на північному сході країни, в той час як на решті території дослідження величина суворості не перевищувала -10. Протягом другого періоду для цього ж масштабу часу значення суворості склали -20...-10, проте в районі Волинської області зафіксований осередок з суворістю понад -60. Просторово-часовий розподіл суворості екстремальних посух для масштабу часу 24 місяці представлений на рис. 5, з якого видно, що в період 1951–1980 рр. практично на всій території дослідження переважала суворість зі значеннями -10...0, та лише на сході вона зростала до -30...-20. В той час в період 1981–2010 рр. в районі південного сходу та крайніх західних регіонів величина суворості зростає до значень -70...-50, що свідчить про досить вагомий значення суворості екстремальних посух у вказаних регіонах при їх незначній загальній кількості.

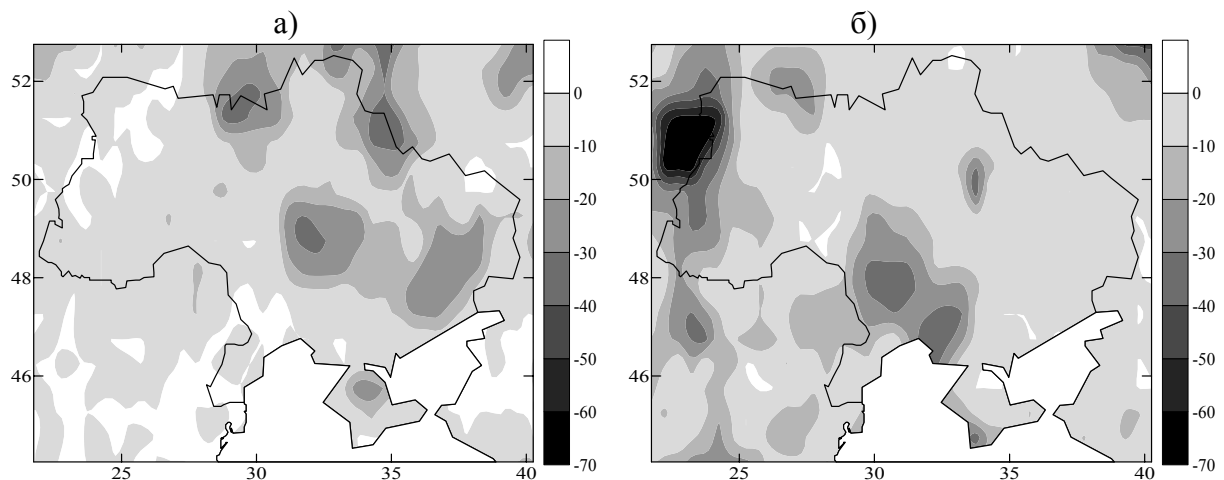


Рис. 5 – Суворість екстремальних посух з масштабом часу 24 місяці:  
(а) – з 1951 по 1980 рр.; (б) – з 1981 по 2010 рр.

Наступним етапом дослідження стало порівняння просторово-часової мінливості посух з просторово-часовою мінливістю середнього річного стоку р. Південний Буг, оскільки в межах басейну саме цього водного об'єкту в більшості випадків спостерігались осередки максимумів практично усіх розглянутих характеристик посухи.

Порівняльний аналіз вищевказаних параметрів проводився для 18 гідрологічних станцій та постів, розташованих вздовж русла р. Південний Буг. Але виявилось, що часова мінливість індексу SPEI та річного стоку має подібний розподіл на всіх станціях. Тому розглянемо розподіл цих характеристик на прикладі однієї з найбільш характерних станцій – Катеринка, що знаходиться в Первомайському районі Миколаївської області.

На рис. 6–7 представлений сумісний розподіл середнього річного стоку на станції Катеринка в період 1951–2010 рр. та стандартизованого індексу опадів та сумарного

випаровування з масштабом часу 12 та 24 місяці відповідно. Аналізуючи рис. 6, можна відзначити, що практично на протязі всього періоду дослідження часовий хід річного стоку в своїй більшості співпадає з розподілом індексу SPEI з 12-місячним масштабом часу в цей же час. Так, найбільш інтенсивним та тривалим посухам відповідали періоди з мінімальним середнім річним стоком і, навпаки, найбільш зволуженим рокам відповідають часові проміжки з максимальними значеннями стоку. На початку досліджуваного періоду (в 1951–1952 рр.) спостерігалось зниження річного стоку, а відповідно значення SPEI склали близько -1,8. Далі в наступні декілька років фіксувались додатні значення SPEI, які свідчать про достатньо зволожені роки, що й підтверджують значення річного стоку.

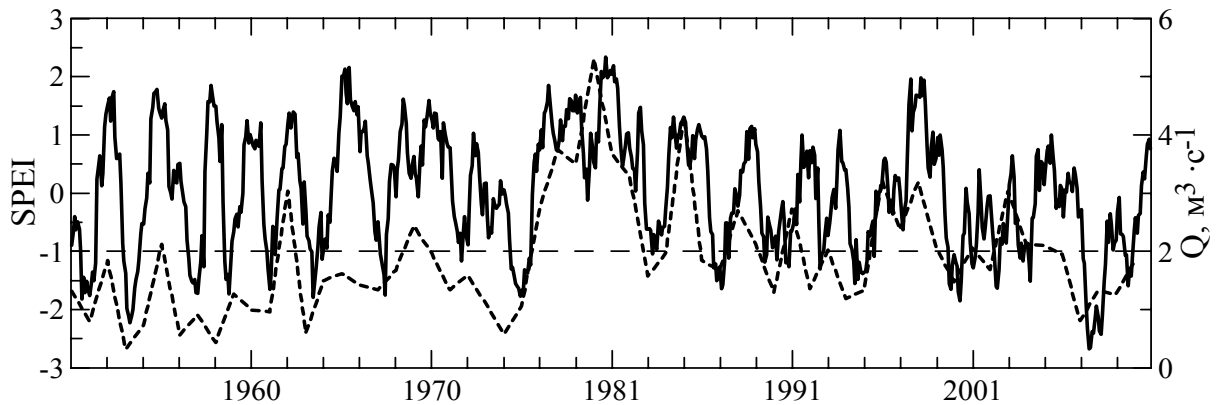


Рис. 6 – Розподіл індексу SPEI (—) з масштабом часу 12 місяців та середній річний стік Q (---) на гідрологічній станції Катеринка з 1951 по 2010 рр.

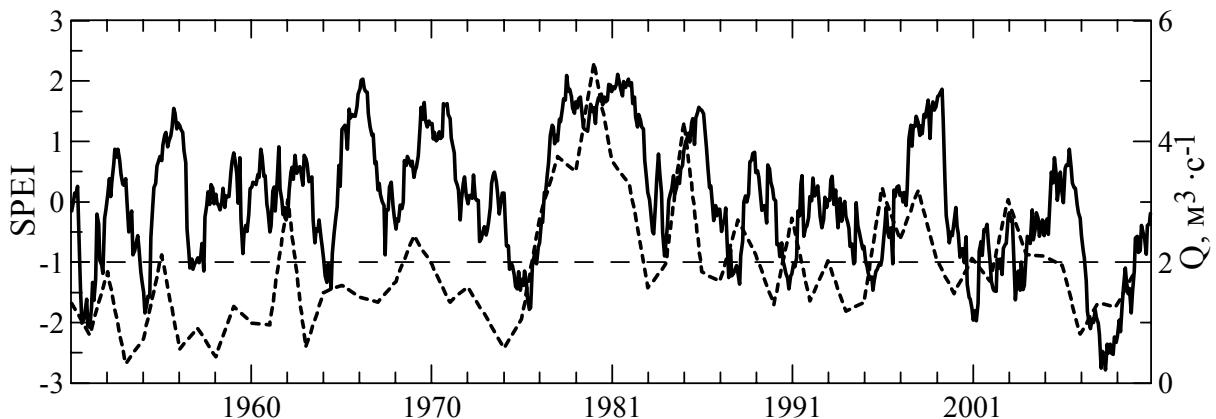


Рис. 7 – Розподіл індексу SPEI (—) з масштабом часу 24 місяці та середній річний стік Q (---) на гідрологічній станції Катеринка з 1951 по 2010 рр.

Наступна достатньо інтенсивна посуха, а отже й мінімальні значення стоку ( $0,32 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ), спостерігалась в період 1953–1954 рр., при цьому з березня по травень 1954 р. посуха досягала критеріїв екстремальної. Далі декілька років спостерігалось поетапне чергування вологих та посушливих періодів. Наступним характерним періодом став – 1975–1976 рр. В цей час тривалість посухи перевищувала рік, а величина річного стоку знизилась до значень  $0,58 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , що ще раз підтверджує тісний взаємозв'язок часової мінливості індексу посухи та середньорічного стоку.

Черговий етап даного розподілу відзначився тривалим зволуженим періодом часу (з 1976 р по 1983 р.), на протязі якого й був зафіксований абсолютним максимум річного стоку за весь період дослідження –  $5,31 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  в 1980 р. Далі практично до кінця періоду спостерігалось чергування помірно посушливих періодів з невеликими значеннями стоку, та помірно вологих з середньою величиною річного стоку р. Південний Буг. Але все ж таки окремо слід відзначити посуху, яка спостерігалась наприкінці періоду дослідження, і тривала з 2007 р. по 2008 р. Вказана посуха відзначається своєю тривалістю та надзвичайною інтенсивністю, яка є

максимальною серед усіх посух, що спостерігались за весь період дослідження. Так, за своїми критеріями вона являлась екстремального практично протягом всього часу, та абсолютний максимум інтенсивності, зареєстрований в середині 2007 р., становить -2,68. Цей факт також має своє відповідне відображення в зниженні річного стоку у вказаний період часу.

Часова мінливість індексу посухи SPEI з масштабом часу 24 місяці подібна тій, що спостерігається для посух з масштабом часу 12 місяців, й не має особливих суттєвих відмінностей, оскільки абсолютний максимум річного стоку й найбільш тривалий зволожений період також тривав з 1976 р. по л 1982 р. А найбільш інтенсивна та тривала посуха спостерігалась з 2006 р. по 2009 р., при цьому в період 2006–2008 рр. посуха була екстремальною.

**Висновки.** В останні десятиріччя в умовах глобальних змін клімату спостерігається суттєве збільшення кількості, тривалості та суворості всіх типів посух, що підтверджують результати даного дослідження. Встановлено, що максимальні значення вказаних характеристик були зафіксовані в період глобального потепління, тобто протягом 1981–2010 рр. Порівняльний аналіз часової мінливості посух з розподілом середнього річного стоку на гідрологічних станціях р. Південний Буг показав, що посухам відповідають періоди з мінімальним середнім річним стоком і, навпаки, максимальні значення стоку зафіксовані в достатньо зволожені роки.

#### Список літератури

1. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis / S. Solomon et al. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* – Cambridge University Press, 2007. – 996 p.
2. *Dracup J.A., Lee K.S., Paulson E.G. On the statistical characteristics of drought events // Water Resources Research.* – 1980. – Vol. 16, Iss. 2. – P. 289–296.
3. *Fan Y., H. van den Dool. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948–present. // Journal of Geophysical Research.* – 2008. – Vol. 113 – D01103.
4. *Fan Y., H. van den Dool. Climate Prediction Center global monthly soil moisture data set at 0.5° resolution for 1948 to present. // Journal of Geophysical Research.* – 2004. – Vol. 109. – D10102.
5. *McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales // Proceedings of Eighth Conference on Applied Climatology.* – Anaheim (USA). – 1993. – P. 179–184.
6. *Mishra A.K., Singh V.P. A review of drought concepts // Journal of Hydrology.* – 2010. – Vol. 391. – P. 202–216.
7. *Robock A., Mu M., Vinnikov K., Trofimova I.V., Adamenko T.I. Forty-five years of observed soil moisture in the Ukraine: No summer desiccation (yet) // Geophysical Research Letters.* – 2005. – Vol. 32. – L03401.
8. *Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index // Journal of Climate.* – 2010. – Vol. 23, Iss. 7. – P. 1696–1718.

#### **О связи засух с средним годовым стоком р. Южный Буг в период 1951–2010 гг. Хохлов В.Н., Ермоленко Н.С.**

*Изучается пространственно-временное распределение характеристик различных засух с масштабами времени 12, 24 месяца в течение 1951–1980 и 1981–2010 гг. для территории Украины. Выявлено, что наибольшее количество продолжительных и суровых засух наблюдалось в период глобального потепления. Также установлена тесная взаимосвязь между временной изменчивостью засух и средним годовым стоком р. Южный Буг на протяжении 1951–2010 гг.*

**Ключевые слова:** стандартизованный индекс осадков и суммарного испарения, пространственно-временное распределение, продолжительность и суровость засухи.

#### **On the connection of drought with average annual flow of the Southern Bug River during 1951–2010. Khokhlov V.N., Yermolenko N. S.**

*We study a spat–iotemporal variability for the features of droughts at the time scales 12, 24 months during 1951–1980 and 1981–2010 for Ukraine. It was found that the maximum number of long and severe droughts was registered in the period of global warming. It is also found a strong relationship between temporal variability of drought and an average annual flow of the Southern Bug River during 1951–2010.*

**Keywords:** standardized precipitation evapotranspiration index, maximum number of droughts, spatiotemporal distribution, duration and severity of drought.

## РОЛЬ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ АТМОСФЕРИ В ПРОЦЕСАХ ВІДСІЧЕНОГО ЦИКЛОГЕНЕЗУ ВЛІТКУ НАД УКРАЇНОЮ

*Представлено аналіз випадків інтенсивного циклогенезу, пов'язаного з циклонами відсікання над територією України у літній період виконаний з використанням критеріїв гідродинамічної нестійкості.*

**Ключові слова:** потенціальний вихор, абсолютний вихор, циклон відсікання, гідродинамічна нестійкість.

**Вступ.** Активна циклонічна діяльність над Україною влітку пов'язана з особливостями висотного поля тиску над Східною Європою, а саме з відсіченням осередку холодного повітря з утворенням відокремленої від основного потоку глибокої улоговини, орієнтованої на південь України [1]. Утворення в подальшому приземного циклону призводить до різкого погіршення погодних умов, часто з небезпечними та стихійними явищами (сильні зливи, град, шквали тощо).

В теоретичних дослідженнях енергетики цикло- та антициклогенезу прийнято вважати, що розміри збурень, здатних зростати у повітряному потоці заданої стратифікації, визначаються довжиною хвилі, яка має найбільший показник зростання в спектрі нестійкості даного потоку [2]. Сам по собі показник зростання найбільш нестійкої хвилі визначає швидкість зростання збурення на початковій стадії, коли нелінійні взаємодії ще не відіграють суттєвої ролі. Інтерес представляє порівняння розрахованих за реальними даними характеристик атмосферних збурень, що розвиваються, з параметрами найбільш нестійких хвиль у спектрах великомасштабних потоків на момент утворення збурень. Зазвичай в дослідженнях атмосферної нестійкості передбачається, що в атмосфері існує зональний потік, який описується одним з видів гідродинамічної нестійкості: бароклінною, баротропною або комбінованою баротропно-бароклінною нестійкістю, які можна оцінити за допомогою модельних критеріїв [2-4].

**Мета роботи** полягає в оцінці інтенсивності циклогенезу у випадках відсічених циклонів у теплий період року над територією України за допомогою кількісних критеріїв, що характеризують різні види гідродинамічної нестійкості атмосфери.

**Об'єкти дослідження та вихідні матеріали.** Розглянуто розвиток 4 випадків циклонів відсікання з 2001 по 2011 рр., що утворилися над територією України в літній період року [1,5]. В усіх випадках в процесі еволюції спочатку спостерігалась локалізація осередку холоду в середній тропосфері над півднем України, потім утворювався висотний циклон, який за сприятливих гідродинамічних умов розповсюджувався до поверхні землі. Оцінка гідродинамічної нестійкості атмосфери в період розвитку таких циклонів проведена за допомогою критеріїв Філіпса, Релея-Куо, Чарні-Стерна, які характеризують відповідно умови реалізації бароклівної, баротропної та бароклінно-баротропної нестійкості.

Вихідними даними для розрахунку критеріїв слугували поля ре-аналізу центру NCEP/NCAR температури, абсолютного вихору, складових швидкості вітру з кроком сітки 2.5x2.5 градуси, на рівнях 700, 600, 500,400,300, 250 гПа, отримані за допомогою бібліотеки IRI/LDEO (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/>)

**Методи дослідження.** Дослідження виконані на основі відомих робіт [2-4], що дає змогу встановити універсальність чисельних оцінок та використання в

прогностичній практиці критеріїв баротропної та бароклінної нестійкості. Розрахунки засновані на попередній оцінці повторюваності та інтенсивності процесів літнього швидкого циклогенезу та аналізі профілей відносного та потенційного вихорів [1, 5-7] у циклонах відсікання.

Для баротропної нестійкості кінетична енергія зонального потоку є головним джерелом енергії збурень. Швидкість потоку змінюється в горизонтальному напрямку, вертикальний зсув вітру відсутній, потік вважається гідростатичним та геострофічним, а збурення, які мають в ньому місце, квазігеострофічними та бездивергентними. Критерій стійкості визначається теоремою Го: баротропний потік є стійким, якщо його абсолютний вихор монотонно змінюється з широтою. Інакше кажучи, критерієм нестійкості основного потоку відповідно є немонотонність профілю абсолютного вихору, і визначається наявністю екстремуму абсолютного вихору в горизонтальному потоці (критерій Релея-Куо) [8]:

$$\frac{\partial \Omega_a}{\partial y} = \beta - \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} = 0, \quad (1)$$

де  $\Omega_a$  – абсолютний вихор швидкості;  $u$  – зональна складова швидкості потоку;

$\beta = \frac{\partial f}{\partial y}$  – параметр Россбі;  $l$  – параметр Коріоліса;  $\Omega_a = \Omega + l$ ;  $\Omega$  – відносний вихор швидкості.

При цьому ставиться умова непротікання через межі широтної смуги, в якій задається профіль зональної швидкості [8].

Реалізація бароклінної нестійкості при малих числах Россбі характерна для процесів синоптичного масштабу – циклонів та антициклонів. Модель Чарні [9] враховує  $\beta$ -ефект та стислість атмосфери через рівняння нерозривності, тому сформульована умова для розв'язання задачі про бароклінну нестійкість зонального потоку досить повно характеризує процеси реальної атмосфери:

$$\frac{\partial}{\partial y} (\bar{q}_g + f) = 0, \quad (2)$$

де  $\bar{q}_g$  – відносний квазігеострофічний потенціальний вихор;  $f$  – квазігеострофічний абсолютний потенціальний вихор.

В реальній атмосфері умова (2) майже завжди виконується, тобто похідна  $(\bar{q}_g + f)$  в межах помірних широт декілька разів може змінювати знак по широті, що означає постійну бароклінну нестійкість атмосферної течії [2].

Обидві умови (1) та (2) є необхідними для здійснення певного виду нестійкості, але слід враховувати також умову достатності, а саме перехід через нуль повинен відбуватися від додатних до від'ємних значень меридіонального градієнта абсолютного або потенціального вихору.

В даній роботі для практичних розрахунків критерій Чарні-Стерна використаний у вигляді [2].

$$\frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

де  $q$  – потенційний вихор Ертеля;  $q = (\Omega + l) \frac{\partial \theta}{\partial p}$ .

Для оцінки властивостей фонового потоку, який виступає джерелом енергії для збурень синоптичного масштабу, доволі часто застосовується критерій нестійкості Філіпса [2-4, 10].

Цей критерій дає оцінку енергії барокліної нестійкості потоку в двошаровій моделі та базується на порівнянні двох параметрів:

$$\delta p_1 = U_1 - U_3$$

$$\delta p_2 = 0,124 C_p \frac{\theta_1 - \theta_3}{2R\omega} \frac{\cos \varphi}{\sin^2 \varphi}, \quad (4)$$

де  $U_1$  та  $U_3$  – зональні складові швидкості вітру відповідно на поверхнях 250 та 750 гПа;  $R$  – радіус Землі;  $\omega$  – кутова швидкість обертання Землі;  $\theta_1$  та  $\theta_3$  – потенціальні температури на поверхнях 250 та 750 гПа;  $\varphi$  – широта.

За міру нестійкості береться різниця

$$\delta p = \delta p_1 - \delta p_2. \quad (5)$$

Чим більше значення  $\delta p$ , тим більш нестійким є потік. Характер розподілу  $\delta p$  відповідає розподілу струминних течій, які є найбільш енергоактивними зонами. Положення областей максимальних значень  $\delta p$  над Північною півкулею в цілому узгоджується із зонами утворення циклонів [2].

**Результати та їх аналіз.** Циклогенез 26-27 червня 2011 р., що супроводжувався сильним вітром та опадами в південних та центральних областях України, був обраний як типовий для подальшого аналізу. На висотних картах погоди за цей період можна побачити відсічену улоговину з висотним циклоном на рівні 500 гПа, в області якої протягом доби біля поверхні землі утворився глибокий та інтенсивний циклон. На карті ВТ-500/1000 в районі утворення циклону присутній осередок холоду. Мінімальний тиск у циклоні становив 996 гПа (рис. 1).

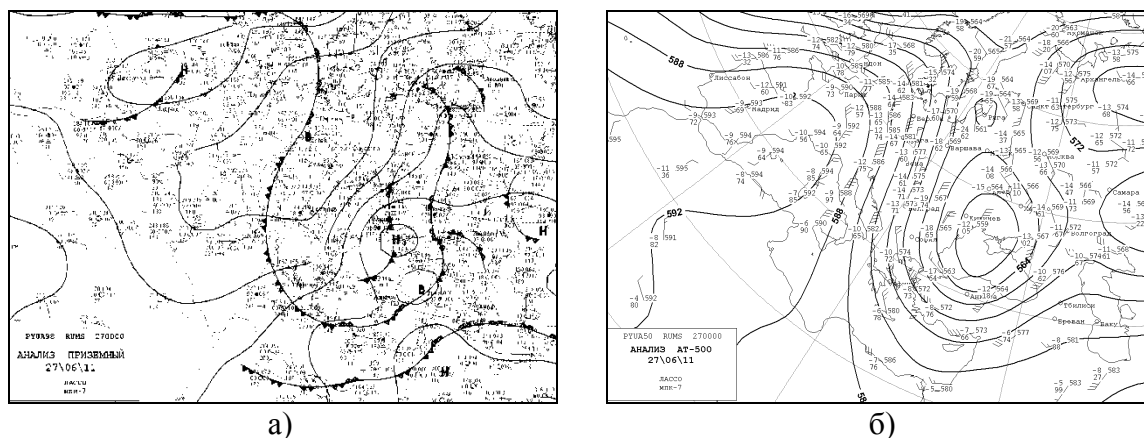


Рис. 1 - Синоптичні карти за 27.06.2011 р.: приземна (а) і АТ-500 (б)

Деформований профіль інтенсивного прориву субстратосферного повітря 26 червня 2011 р. для поверхні 400 гПа показує, що в області струминної течії відбулося опускання сухого та холодного повітря на циклонічному боці струменя з одночасним висхідним рухом на теплому боці (рис. 2а). Цей процес підтверджується



даними супутникового ВП-знімку, де область низхідного прориву відповідає вузькому темному струменю у тилевій частині такої ж вузької баричної улоговини (рис. 2б).

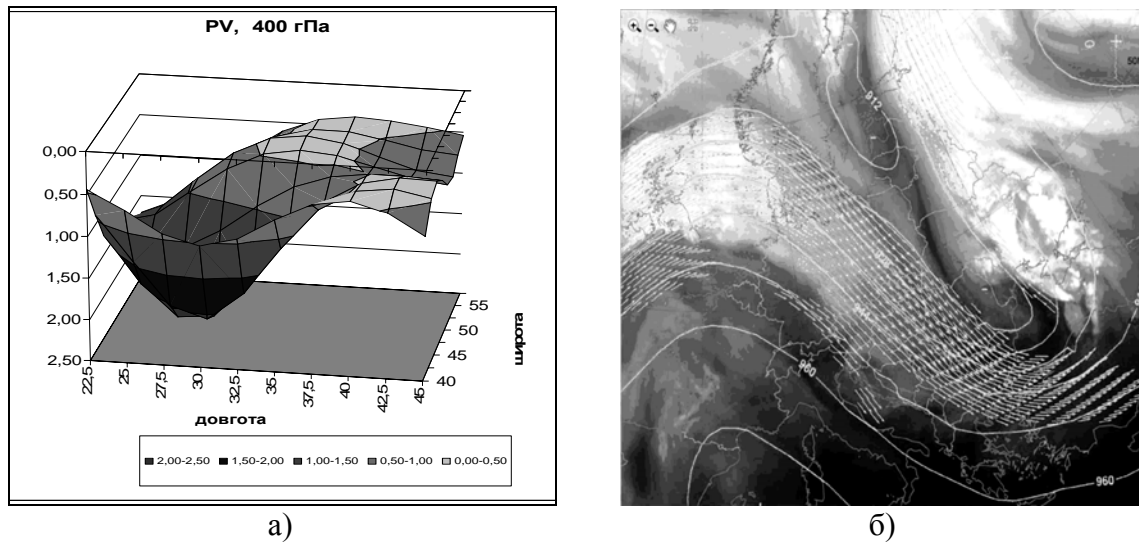


Рис. 2 - Розподіл потенціального вихору поверхні 400 гПа в області циклону (а) та ВП-знімок з полями геопотенціальної висоти і вітру на АТ-300 (б)

У статті наведено критерії барокліної та баротропної нестійкості для обраних випадків циклогенезу. Розглянемо особливості розподілу кожного з критеріїв напередодні та в день появи циклонічної циркуляції біля поверхні землі.

Значення критерію Філіпса мало змінюються поміж випадками, при цьому в найбільш інтенсивному процесі червня 2011 р. максимальні значення критерію є не найбільшими, тобто цей критерій не може виступати показником інтенсивності майбутнього циклогенезу. Цей висновок підтверджується осередненими по площі розрахунку для кожного циклону значеннями критерію Філіпса, представленими у табл. 1, де у випадку 26-27 червня осереднене значення критерію найменше з розглянутих. В усіх випадках відбувається загальне зменшення осереднених значень критерію від першого до другого дня, що відповідає процесу переходу кінетичної енергії основного потоку, яка зменшується, в кінетичну енергію циклонічного вихору, який ще не набрав своєї потужності в першу добу існування.

Таблиця 1 – Критерій Філіпса ( $m \cdot s^{-1}$ ), осереднений по площі циклону

Дата	2004 р.		2010 р.		2011 р.		2011 р.	
	19.09	20.09	23.07	24.07	26.06	27.06	13.08	14.08
$\delta\varphi$	18,5	17,3	21,2	19,4	15,4	12,0	20,7	17,9

На рис. 3 представлені поля критерію Філіпса, розрахованого за формулою (3), зірочкою позначений центр приземного циклону. У всіх розглянутих ситуаціях схожі особливості, спричинені наявністю одноманітної структури висотного баричного поля – висотного циклону. Центру приземного циклону відповідає область малих значень критерію, що зумовлено малими швидкостями вітру в центрі висотного циклону, а найбільші значення критерію спостерігаються на південь від приземного центру, в зоні активної ділянки висотно-фронтальної зони (ВФЗ) на периферії висотного циклону.

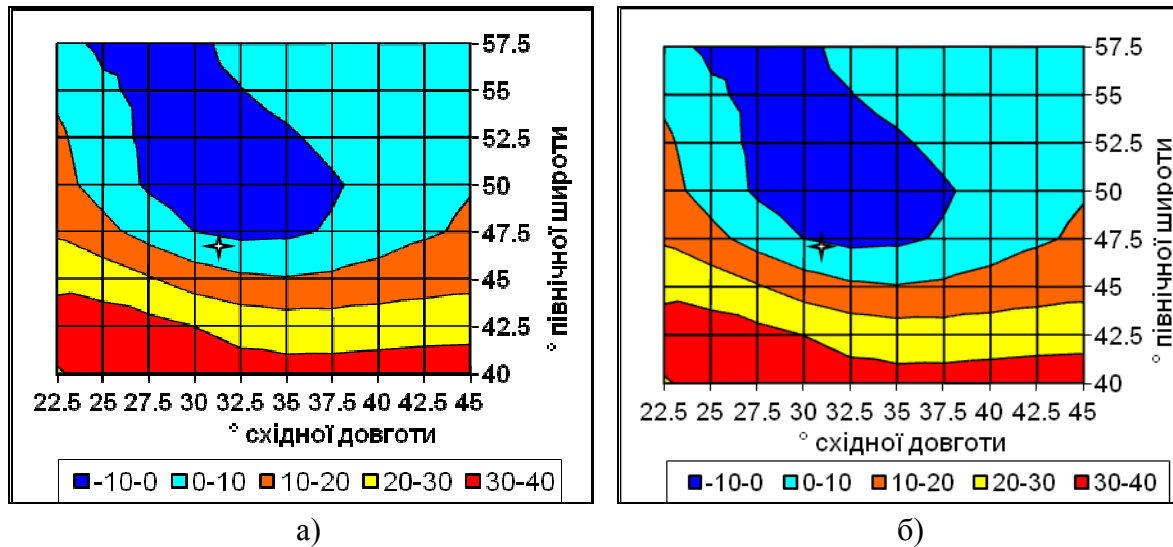


Рис. 3 - Поля критерію Філіпса ( $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) для випадку циклогенезу 26.06.2011 р. (а), 27.06.2011 р. (б)

В процесі розвитку циклонічної циркуляції від 26 до 27 червня 2011 р. відбулося збільшення градієнтів тиску в усій тропосфері, що призвело до посилення поля критерію Філіпса в день утворення приземного циклону. В інших випадках додатні значення критерію на периферії висотного циклону були більшими напередодні утворення приземного циклонічного вихору.

Розрахунок критерію Релея-Куо за формулою (1) для визначення ступеня баротропної нестійкості зонального потоку в нашому випадку має деякі особливості, адже за наявності висотного циклону потік сильно відхиляється від зонального положення. Найбільш цікавими є передня (східна) і тилова (західна) частини висотного циклону, де відбувається найбільш інтенсивна адвекція температури та спостерігаються струминні течії. Для 4-х випадків циклогенезу були розраховані поля критерію Релея-Куо для випадку циклогенезу та виділені меридіональні профілі критерію по трьох довготах, які відповідають меридіональному положенню ВФЗ в тилівій та передній частинах висотного циклону, а також центру приземного вихору.

В усіх випадках умова нестійкості зонального потоку виконується – абсолютний вихор швидкості змінюється вздовж кожної з виділених довгот, при цьому перехід від додатних до від’ємних значень похідної відбувається в межах  $45\text{--}47^\circ$  півн.ш. Так, 26-27 червня 2011 р. (рис. 4) на довготі  $22,5^\circ$  сх.д. (тобто в тилівій частині циклону) похідна абсолютного вихору майже всюди від’ємна, найбільша нестійкість відповідає центру циклону. Загалом, похідна  $\partial\Omega_a/\partial y$  має додатні значення в низьких широтах, перший екстремум досягається між  $42,5$  та  $47,5^\circ$  півн.ш. (для центральної довготи) та співпадає з положенням приземного центра циклону, далі похідна набирає від’ємних значень, між  $52,5$  та  $57,5^\circ$  півн.ш. спостерігається другий екстремум та зміна знаку похідної. Такий профіль можна вважати умовно типовим для розглянутих процесів циклогенезу, пов’язаних з відсіченою улоговиною, однак, цей висновок потребує підтвердження на більшій кількості випадків.

Аналогічний аналіз був проведений для оцінки баротропно-барокліної нестійкості потоку за допомогою розрахованих полів критерію Чарні-Стерна (2), який передбачає зміну знаку меридіональної похідної потенціального вихору в нестійкому потоці. На (рис. 5) видно, що отримані профілі для трьох виділених довгот загалом аналогічні профілям критерію Релея-Куо (рис. 4).

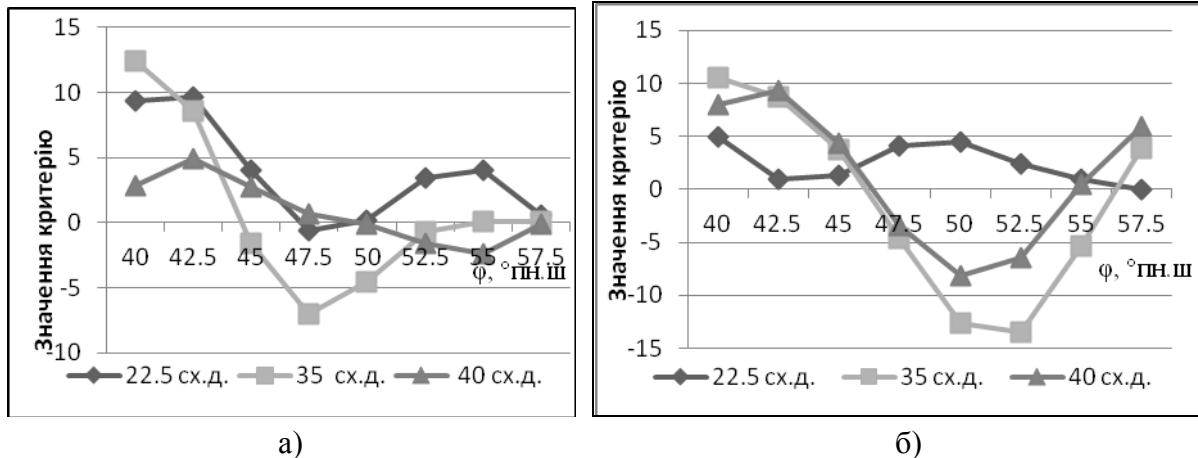


Рис. 4 - Графіки розподілу критерію Релея-Куо ( $10^{-11} \text{ c}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ) по довготах за 26.06.2011 р. (а) та 27.06.2011 р. (б)

Нестійкість потоку чітко виражена в тильній частині циклону, порівняно з баротропним критерієм, за яким потік тут є стійким. Тобто в розглянутих процесах циклогенезу можна вважати основним процес реалізації бароклінно-баротропної нестійкості, хоча на середньому рівні (АТ-500 гПа) задовільним є використання умови баротропної нестійкості завдяки незначній адвекції температури в висотному циклоні.

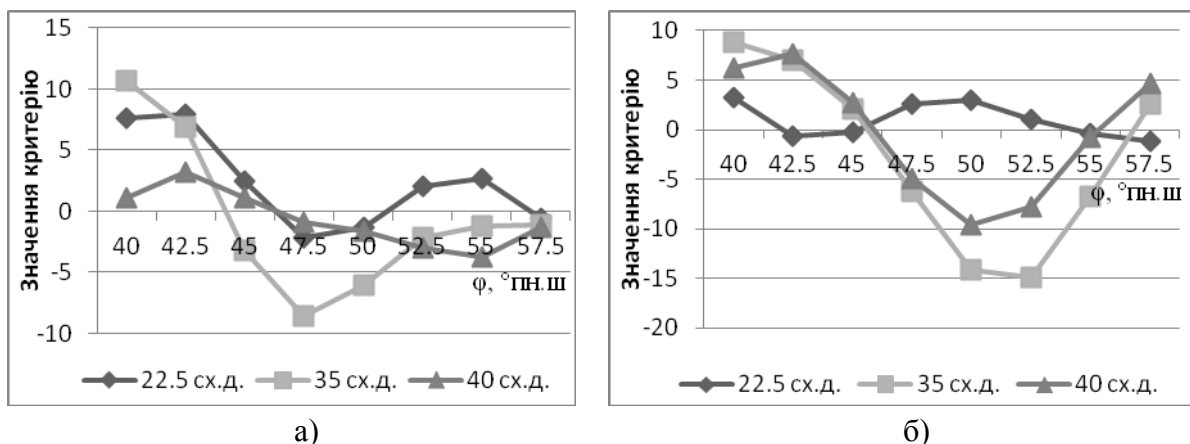


Рис. 5 - Графіки розподілу критерію Чарні-Стерна ( $10^{-11} \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$ ) по довготах за 26.06.2011 р. (а), та 27.06.2011 р. (б)

**Висновки.** Аналіз критеріїв (Філіпса, Релея-Куо та Чарні-Стерна) для різних видів гідродинамічної нестійкості дозволив виявити деякі особливості в застосуванні цих критеріїв для випадків вже існуючих висотних циклонів (улоговин). Розглянуті критерії вказували на наявність умов для реалізації бароклінно-баротропної нестійкості в області розрахунку напередодні та на початку утворення приземного циклону. При цьому критерій Філіпса був найбільшим на південній периферії висотного циклону, а в області зародження приземного центра значення цього критерію були близькими до нуля. Критерії Релея-Куо та Чарні-Стерна виконувалися для всіх розглянутих випадків на всій області висотного циклону, що свідчить про переважання механізму бароклінно-баротропної нестійкості в процесах відсіченого циклогенезу. Отримані результати можуть використовуватись при діагностуванні процесів швидкого циклогенезу над районами України.

## Список літератури

1. Семенова І.Г., Ковальков І.А. Особливості утворення циклонів влітку над Східною Європою. Актуальні проблеми сучасної гідрометеорології. // Міжнар. Наук. конф. Студ. та молод. вчених 17-19 жовтня 2012 р. - Одеса, 2012. - С. 147-148.
2. Шакина Н.П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат. – 1990. – 310 с.
3. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Объективный анализ атмосферных фронтов и оценка его эффективности // Метеорология и гидрология. – 2000. - №7. - С. 5-16.
4. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. и др.. Диагностические исследования и моделирование процессов циклогенеза, фронтогенеза и погодных условий на различных стадиях развития циклонов // Труды ГМЦ РФ. – 2000. – Вып. 335 – С. 3-25.
5. Ковальков І.А. Умови літнього циклогенезу над Східною Європою. // Матеріали конференції молодих вчених. 9-13 квітня 2012 р. – Одеса, 2012. – С 154.
6. Ковальков І.А. Поля относительного вихря скорости в периоды активного циклогенеза над Европой // Збірник статей за матеріалами студ. наук. конф. ОДЕКУ 6-16 квітня 2011р. – Одеса 2011. – С. 8-11.
7. Семенова І.Г., Ковальков І.А. Физические аспекты быстрого циклогенеза над Украиной 26-27 июня 2011 г. Сб. научн. трудов Sworld. Одесса. – 2012. – Т. 49. - С. 80-93.
8. Грушевский О.Н., Ешану А.Е. Параметры зональных потоков, спектры баротропной и бароклинической неустойчивости на  $\beta$  – и  $f$ -плоскостях для циклогенеза различной интенсивности // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2010. - Вип. 9. – С. 124-133.
9. Charney J. G., Stern M. E. On the instability of internal baroclinic jets in a rotating atmosphere. // J. Atmos. Sci. - 1962. — Vol. 19. — No. 2. — P. 159-172.
10. Kuo H.L. Dynamic instability of two dimensional nondivergent flow in a barotropic atmosphere. // J. Meteorol., 1949. – vol. 6. – No. 2. – P. 159-172.

### **Роль гидродинамической неустойчивости атмосферы в процессах циклонов отсечения летом над Украиной. Івус Г.П., Семёнова І.Г., Ковальков І.А.**

*Представлен анализ случаев интенсивного циклогенеза, связанного с циклонами отсечения над территорией Украины в летний период, выполненный с использованием критериев гидродинамической неустойчивости.*

*Ключевые слова: потенциальный вихрь, абсолютный вихрь, циклоны отсечения, гидродинамическая неустойчивость.*

### **The role of hydrodynamic instability of the atmosphere in the cut off low process in summer over Ukraine. Ivus G.P., Semenova I.G., Kovalkov I.A.**

*The analysis with using the criteria of hydrodynamic instability for the cases of intensive cyclogenesis, related with cut-off low over territory of Ukraine in summer is presented.*

*Keywords: potential vorticity, absolute vorticity, cut-off low, hydrodynamic instability.*

**Івус Г.П.**, к.геогр.н., **Хоменко Г.В.**, к.геогр.н.  
Одеський державний екологічний університет  
**Зубкович С.О.**, ст.викл.  
Харківський гідрометеорологічний технікум

## ВИКОРИСТАННЯ ФРОНТАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН НЕБЕЗПЕЧНОГО ВІТРУ

*Зроблено сумісний аналіз полів фронтального параметра і небезпечною приземного вітру ( $\geq 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ). Визначено, що між вказаними полями існує кількісний зв'язок, який дозволяє вважати фронтальний параметр одним із предикторів при прогнозі сильного вітру і шквалів.*

*Ключові слова:* фронтальний параметр, бароклініст, небезпечний вітер.

**Вступ.** Характерною рисою приземного вітру є його значна просторова та часова мінливість, тому що і напрямок, і швидкість вітру великою мірою визначається особливостями місцевих умов. Це стосується перш за все порівняно невеликих ( $< 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) швидкостей вітру. Але, коли при певних синоптичних ситуаціях складаються умови для посилення вітру (до  $10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  і більше), то значні швидкості вітру, навіть штормові, можуть спостерігатися над великими територіями. Вивчення таких ситуацій має велике практичне значення, оскільки вітри швидкістю  $> 12 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  є небезпечними для авіації, судноплавства, будівництва та інших галузей економіки.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є кількісна оцінка атмосферних процесів, що відбувалися в період 14-18 грудня 2009 р., впродовж якого над східними та південно-східними районами України сформувалися поля вітру швидкістю  $12 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  і більше, а подекуди – штормові зони.

Відповідно до мети дослідження в роботі виконані такі етапи:

- зроблено якісний аналіз синоптичних процесів у вказаний період;
- розраховані поля фронтального параметра та відносного вихору для кількісного аналізу синоптичних процесів та атмосферних фронтів;
- зроблена оцінка можливості використання фронтального параметра для визначення зон небезпечною вітру.

**Матеріали і методика дослідження.** Для синоптичного аналізу атмосферних процесів використані приземні карти та карти баричної топографії за 00 год 14-18 грудня 2009 р.

Розрахунки фронтального параметра виконані за результатами об'єктивного аналізу полів геопотенціалу, температури та вологості у вузлах географічної сітки точок з кроком  $2,5^\circ$  по широті і довготі за 00 год 14, 15, 16, 17 та 18 грудня. Область розрахунку:  $10\text{-}50^\circ$  сх.д. та  $30\text{-}65^\circ$  півн.ш.

Фронтальний параметр  $\psi$ , який є характеристикою барокліності нижньої половини тропосфери і являє собою горизонтальний градієнт модуля градієнта еквівалентної товщини шару ZTE між ізобаричними поверхнями 850-500 гПа, розраховувався за формулою:

$$\psi = \nabla |\nabla ZTE| \cdot \vec{n}, \quad (1)$$

де  $\vec{n} = -\frac{\nabla ZTE}{|\nabla ZTE|}$  - одиничний вектор, спрямований в область мінімальних значень

температури і вологості;

$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y}$  - двовимірний векторний диференціальний оператор;

$$ZTE = - \sum_{P_l} \frac{P_u}{P_l} \frac{R}{g} \bar{T}_e \cdot \ln \left( \frac{P_u}{P_l} \right). \quad (2)$$

В (2) Р- тиск,  $\bar{T}_e$  - функція від еквівалентної температури

$$T_e = - \frac{[(T_e)_u - (T_e)_l]}{\ln \frac{(T_e)_u}{(T_e)_l}}. \quad (3)$$

В формулах (2), (3) індекси  $u$  та  $e$  означають верхню та нижню ізобаричні поверхні, які обмежують шар атмосфери (в нашому випадку ізобаричні поверхні 500 і 850 гПа).

Відносний вихор у геострофічному наближенні розраховано за даними об'єктивного аналізу

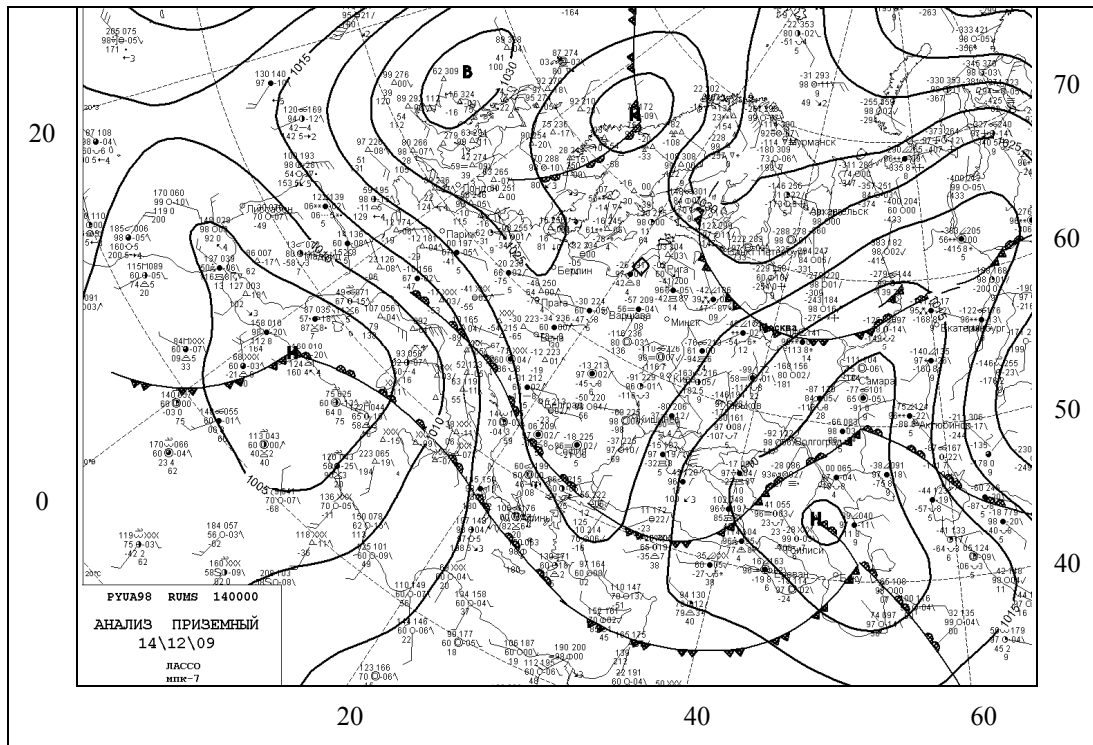
$$\Omega_q = \frac{g}{l} \nabla^2 H,$$

де  $g$  – прискорення сили тяжіння,  $l$  - параметр Коріоліса,  $H$  – висота ізобаричної поверхні 500 гПа;

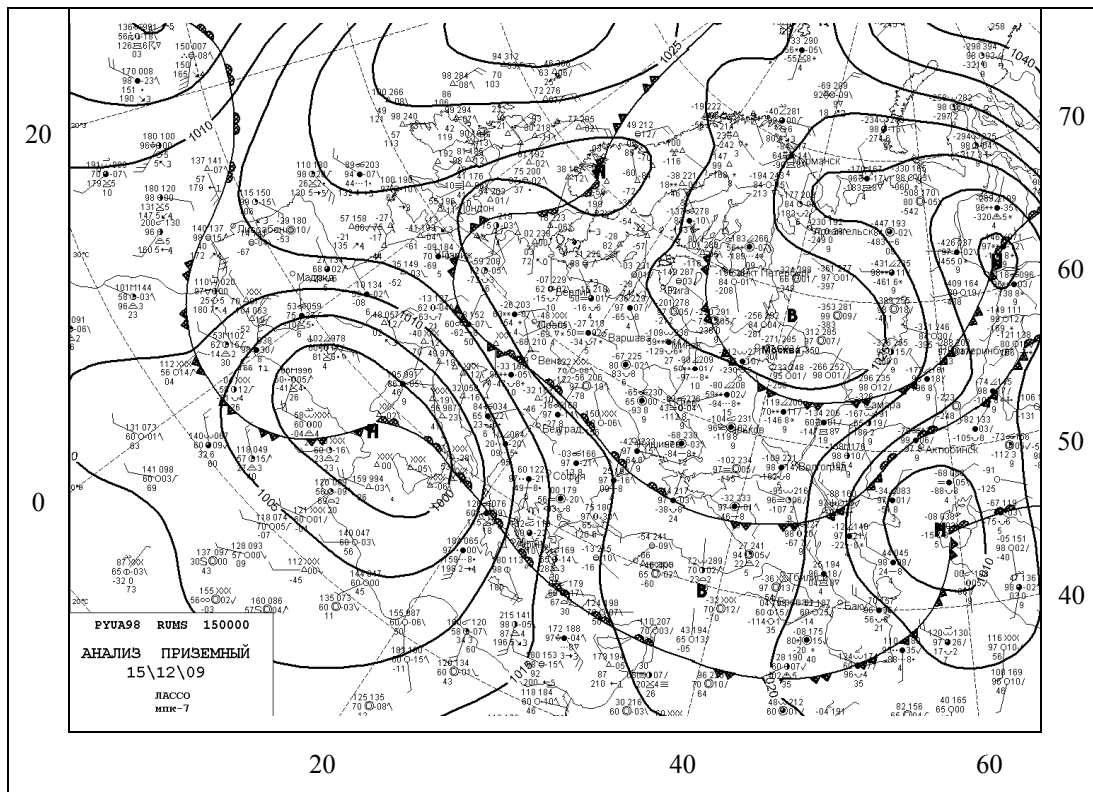
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \text{двовимірний оператор Лапласа.}$$

Аналіз полів вітру зроблено за даними карт небезпечних явищ погоди та штормових оповіщень спільно з полями фронтального параметра та відносного вихору.

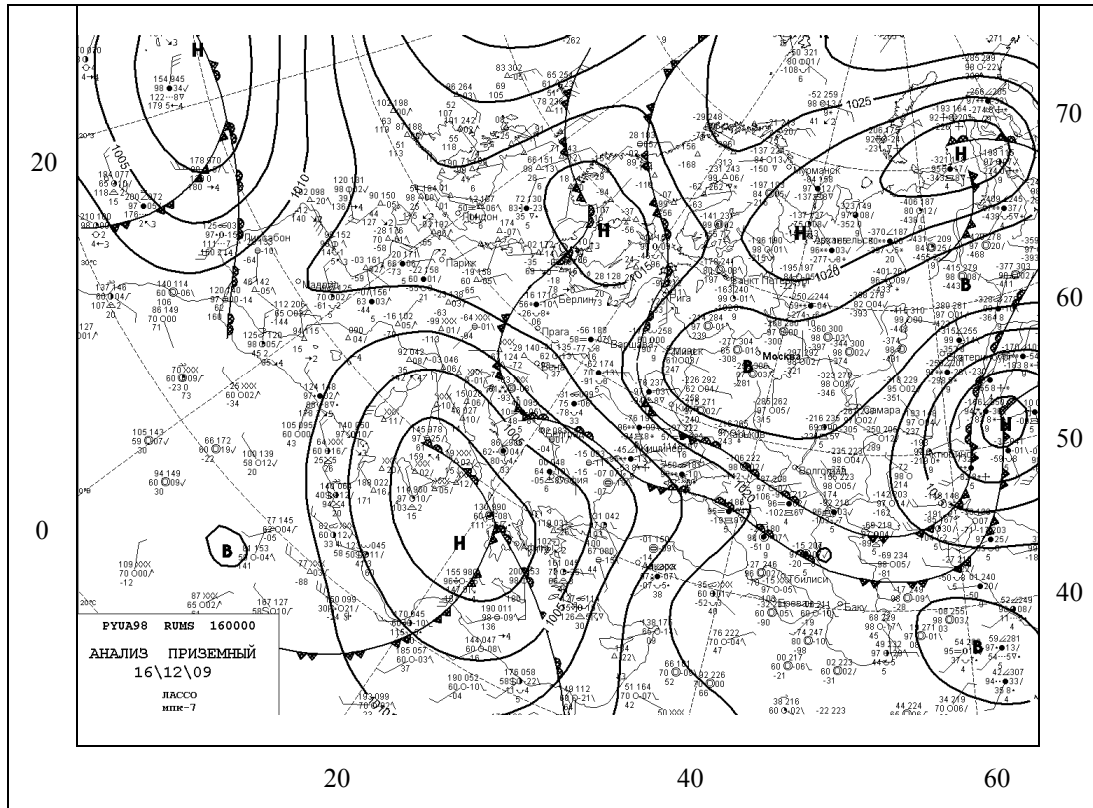
**Результати досліджень та їх аналіз.** Атмосферні процеси, які розглядаються в даній роботі, характеризувалися переважанням меридіональної циркуляції в середній та верхній тропосфері, що сприяло активізації процесів циклогенезу над Середземноморським басейном. Так, 14.12.09 р. над західною частиною Середземного моря сформувався циклон, який в першу половину періоду зміщувався у східному напрямку і 16 грудня його центральна частина знаходилася над Іонічним морем (рис.1а,б,в). Впродовж наступної доби циклон рухався в північно-східному напрямку і 17 грудня він визначав погодні умови над Чорноморським басейном ( рис.1г ). Як видно із рисунків, просуванню циклону на північ і схід перешкождала смуга підвищеного тиску над центральними і східними районами європейської Росії. Тому 18 грудня, центральна частина циклону була розташована над Балканським півостровом і погодні умови над східною Україною зумовлювалися зоною підвищених градієнтів тиску, де проходили гілки арктичного фронту.



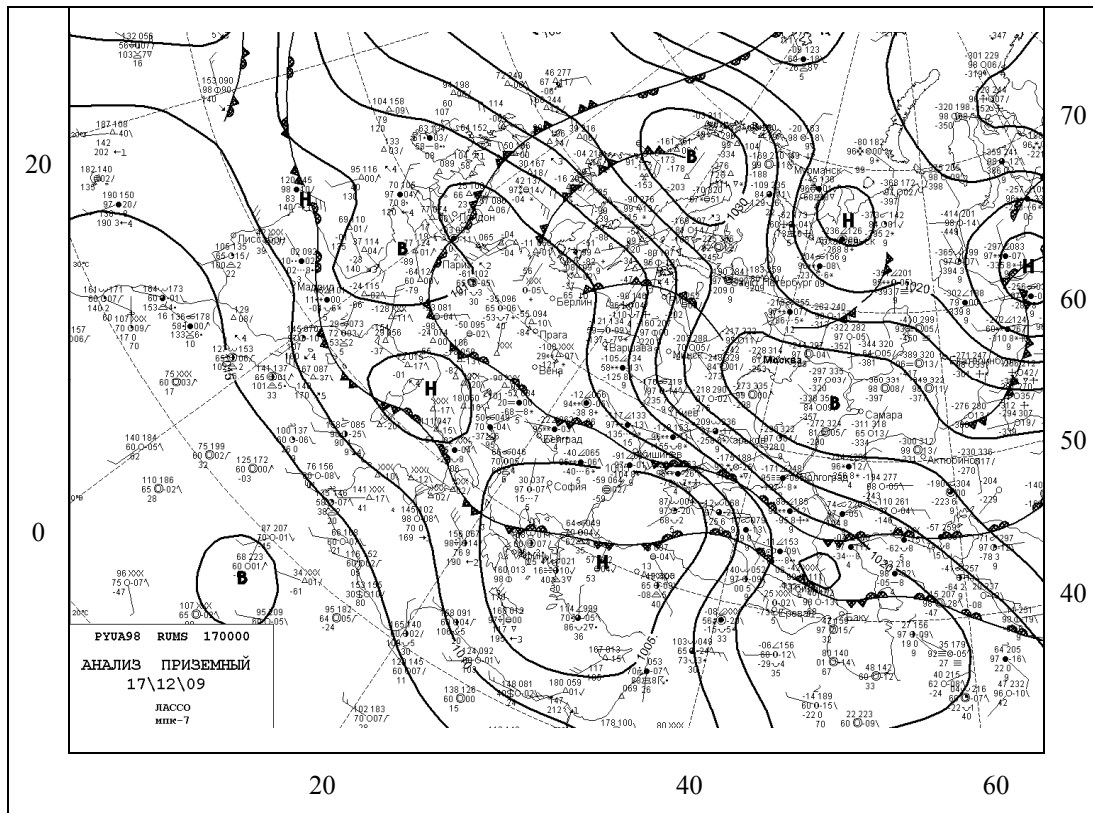
а)



б)



В)

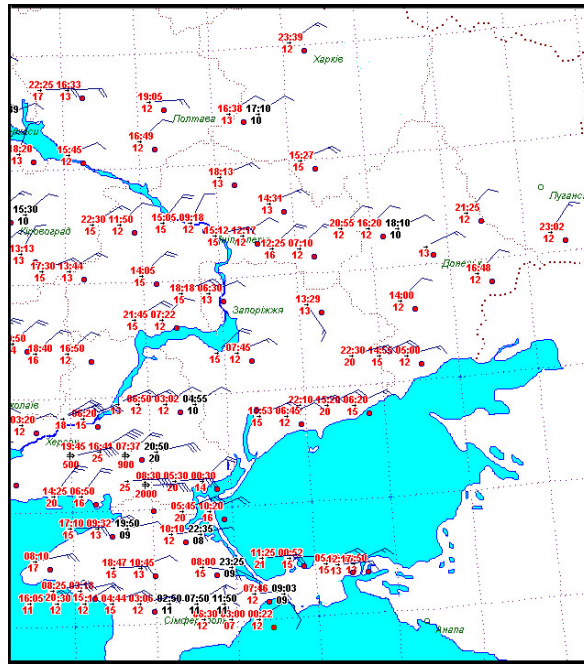


Г)

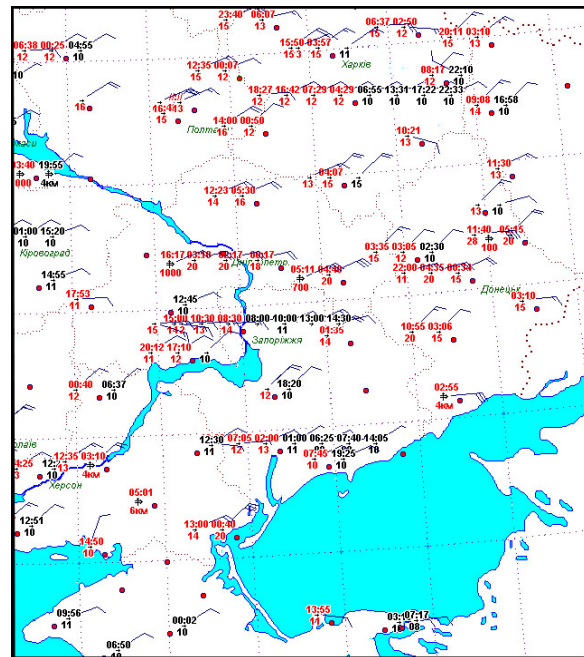
Рис. 1 – Приземний аналіз за 14, 15, 16, 17 грудня 2009 р. (а, б, в, г – відповідно).



Таким чином, посилення швидкості вітру в східних та південно-східних районах України відбувалося за рахунок зближення південного циклону з гребенем антициклону і, як наслідок, зближення систем арктичного та полярного фронтів. В період 15-18 грудня вказані райони знаходились під впливом висотної фронтальної зони, яка найбільшої інтенсивності (до  $20^{\circ}\text{C}/1000\text{ км}$ ) досягала саме 16-17 грудня, коли над більшою частиною східної України переважали вітри швидкістю від 12 до  $16\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , а на узбережжі Азовського моря та в Криму швидкість вітру в окремих пунктах досягала  $20\text{--}25\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  (рис. 2 а, б).



а)



б)

Рис. 2 – Карты штормових повідомлень про вітер: а) за 16.12.09 р.; б) за 17.12.09 р.

В останні роки в аналізі атмосферних процесів широко використовується така кількісна характеристика барокліності, як фронтальний параметр  $\psi$ . Так, в багатьох наукових дослідженнях [1-4] показано, що застосування цієї характеристики є досить ефективним при визначенні фронтальних розділів та пов'язаних з ними зон опадів: отримано кількісний зв'язок параметра  $\psi$  з інтенсивністю опадів. В Російському ГМЦ в рамках технології ГС „Метео” цей параметр використовується для оперативного прогнозу шквалів [1]. В роботі [5] викладені результати чисельних експериментів з прогнозування зон шквалів для території Західної Європи та європейської частини Росії з використанням різних предикторів і, зокрема, параметра  $\psi$ .

В даній роботі зроблена спроба знайти кількісний зв'язок полів небезпечного приземного вітру і параметра  $\psi$  для території України. Значимо, що поряд з параметром  $\psi$  в наукових дослідженнях [1,2] використовується ще й параметр  $F$ , який є сумою:

$$F = \psi + P, \quad (4)$$

де  $P$  – характеризує в основному циклонічність поля тиску в нижній тропосфері. Тобто параметр  $F$  враховує і барокліність нижньої половини тропосфери, і циклонічність поля тиску. Але алгоритм розрахунку параметра  $P$  досить складний і тому, в даній роботі, характер баричного поля визначався за допомогою геострофічного відносного вихору, значення якого розраховані за даними об'єктивного аналізу полів геопотенціалу ізобаричної поверхні 850 гПа за відповідні дні і строки.

В якості прикладу на рис.3 представлені поля фронтального параметра  $\psi$  і вихору швидкості  $\Omega_g$  за 16 і 17 грудня, коли атмосферні процеси були найбільш активними. Як видно із рис. 3 б, г, східна частина України знаходиться в перехідній зоні між областями з додатними величинами  $\Omega_g$  і від'ємними, тобто над територією, що досліджується, значення  $\Omega_g$  коливаються коло нуля. Слід відзначити, що такі значення  $\Omega_g$  зберігалися практично протягом всього розглянутого періоду. Це дає можливість стверджувати, що в даній синоптичній ситуації внесок циклонічності поля тиску незначний і формування полів небезпечного вітру зумовлене в основному барокліним фактором.

Отже, розглянемо спочатку поля фронтального параметра і приземного тиску. Аналіз цих полів показав, що на початку періоду (14.12.09) велика зона додатних значень  $\psi$  знаходилась поза межами території України. Вона відповідала системі полярного і арктичного фронтів, які проходили над північною частиною Середземноморського басейну та над півостровом Малої Азії.

Протягом доби фронтальна система пересувалася в північно-східному напрямку і 15 грудня тепла ділянка арктичного фронту знаходилася вже над північним узбережжям Чорного моря (рис. 1 б). Цій ділянці фронту відповідає досить вузька зона додатних значень  $\psi$  (від 5 до 15 од; за одиницю береться значення  $\psi = 10^{-10} \text{ м}^{-1}$ ). З 15 на 16 грудня відбулося зближення арктичного і полярного фронтів завдяки виходу південного циклону на східну частину Середземного моря і розповсюдженню відроду сибірського антициклону на райони європейської Росії. Як видно із рис. 1в, 3а, зона додатних значень  $\psi$  змістилася на територію України разом з системою фронтів. Ця зона охопила область від 32 до 40 сх.д. і від 43 до 46° півн.ш. Саме в цій зоні спостерігались вітри швидкістю більше  $12 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Найбільш сильні вітри (до  $20\text{-}25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) відмічались поблизу 46° півн.ш., де фронтальний параметр досягав 20 од. (рис. 2а, 3а).

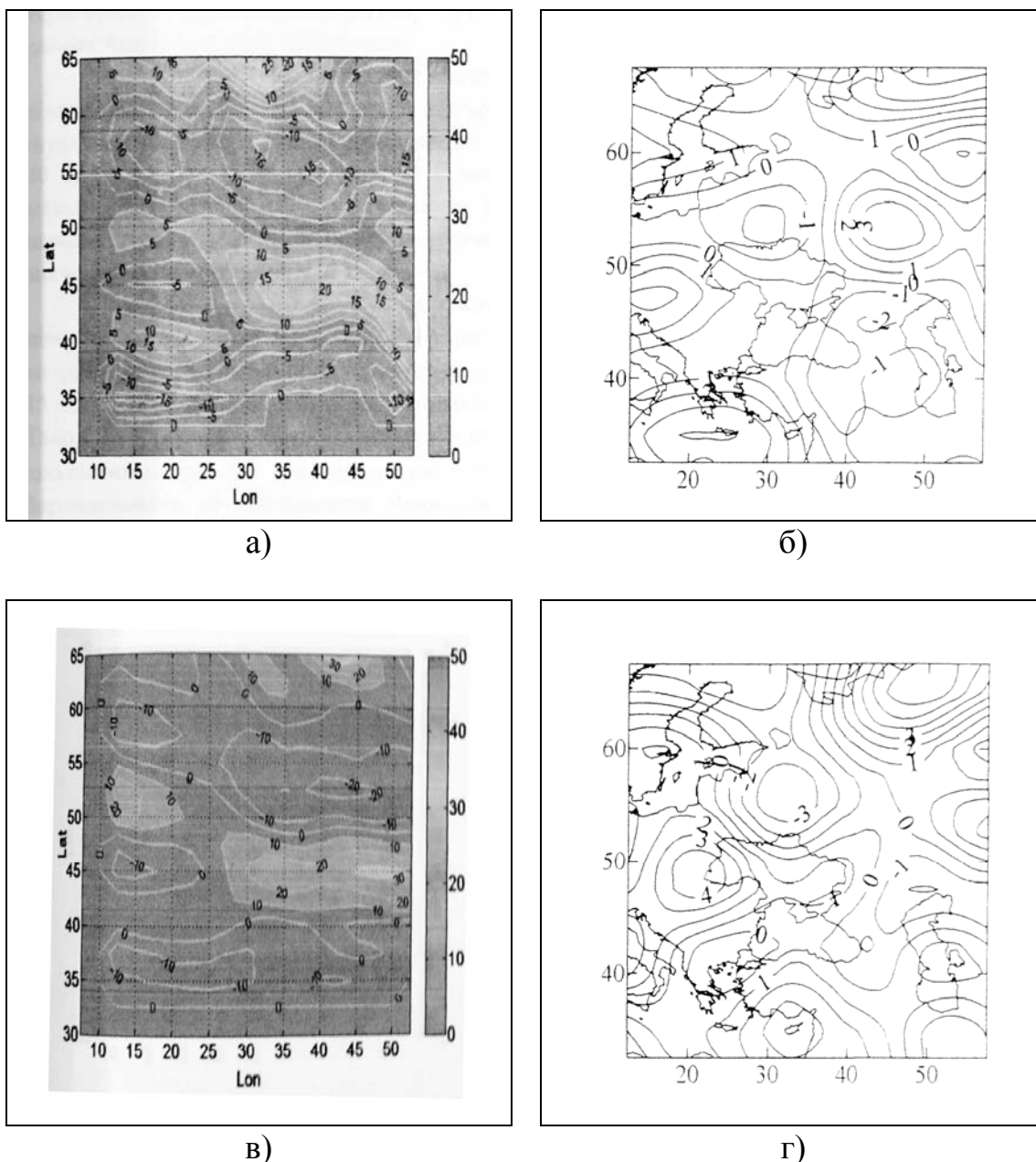


Рис. 3 – Поля фронтального параметра  $\Psi$  ( $10^{-10} \text{ м}^{-1}$ ) та відносного вихору  $\Omega_p$  ( $10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ) відповідно: а, б – за 16.12.09 р.; в, г – за 17.12.09 р.

Аналогічна картина спостерігалась 17 грудня (рис. 2б, 3в), хоча швидкість вітру в Приазов'ї та Криму зменшилася, а смуга найбільш сильних вітрів ( $15\text{-}20 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) зсунулася на північ до  $48^\circ$  півн.ш.

**Висновки.** Таким чином, сумісний аналіз полів фронтального параметра і приземного вітру показав, що між параметром  $\psi$  і швидкістю приземного вітру існує зв'язок, який орієнтовно можна виразити кількісно.

В нашому випадку швидкості  $15\text{-}20 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  спостерігаються в зоні, де  $\psi$  коливається близько 20 од. Швидкостям вітру  $10\text{-}15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  відповідають додатні значення параметра (до 15 од.). Більш слабкі вітри спостерігаються на тих ділянках поля тиску, де фронтальні умови відсутні, тобто параметр  $\psi$  набуває від'ємних значень.

На закінчення значимо, що викладені результати отримані для зимового випадку, пов'язаного з виходом південного циклону і його блокуванням відрогом

сибірського антициклону, коли територія східної України знаходилася в перехідній зоні зі слабо вираженою циклонічністю. Тому, висновки з виконаного аналізу можна узагальнювати на схожі ситуації. Але основний висновок полягає в тому, що фронтальний параметр  $\psi$  можна використовувати як кількісну характеристику, в якості одного із предикторів при прогнозі сильного вітру і шквалів, що узгоджується з результатами роботи [5].

### Список літератури

1. Акулиничева А.А., Беркович Л.В., Соломахов А.Ю., Шмелькин Ю.Л. и др. Геоинформационная система «Метео» и состояние её использования в метеослужбах России и стран ближнего зарубежья // Метеорология и гидрология. – 2001. - № 11. – С. 90-98.
2. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р., Калугина Г.Ю. Субъективный и объективный анализы атмосферных фронтов. II Объективное выделение зон фронтов // Метеорология и гидрология. – 1998. - № 8. – С. 5-15.
3. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н., Иванова А.Р. Объективный анализ атмосферных фронтов и оценка его эффективности // Метеорология и гидрология. – 2000. - № 7. – С. 5-16.
4. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н. Спектр повторяемости осадков на территории Европейской части бывшего СССР в зависимости от интенсивности фронтальных зон и конвективной неустойчивости сеточного масштаба // Метеорология и гидрология. – 2006. - № 4. – С. 5-18.
5. Юсупов Ю.И. К вопросу об оперативном прогнозе шквалов // Тр. ГМЦ РФ. – 2008.- вып. 342.- С. 55-78.

#### **Использование фронтального параметра для определения зон опасного ветра.**

**Ивус Г.П., Хоменко Г.В., Зубкович С.А.**

*Выполнен совместный анализ полей фронтального параметра и опасного приземного ветра ( $\geq 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ). Определено, что между указанными полями существует количественная связь, которая позволяет рассматривать фронтальный параметр как один из предикторов при прогнозе сильного ветра и шквалов.*

**Ключевые слова:** фронтальный параметр, бароклинность, опасный ветер.

#### **Usage of the frontal parameter for determination of hazardous wind zones.**

**Ivus G.P., Homenko G.V., Zubcovich S.A.**

*Combined analysis of fields of the frontal parameter and hazardous surface wind ( $\geq 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ) is executed. It is found that between these fields, there is quantitative relation, which makes it possible to consider the frontal parameter as one of predictors for forecast of high winds and squalls.*

**Keywords:** frontal parameter baroclinicity, hazardous wind.

## **МОДЕЛЮВАННЯ РОСТУ КОЛЕОПТИЛЮ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР В ПЕРІОД «ПОСІВ – СХОДИ»**

*Розглядається розвиток та ріст колеоптиля зернових культур. Описані особливості моделювання розвитку пагона в період від посіву до сходів. Представлені результати проведеного моделювання впливу агрометеорологічних умов на подовження колеоптиля та час появи сходів.*

**Ключові слова:** насіння, ендосперм, зародок, колеоптіль, проросток, пагін, ріст, сходи.

**Вступ.** Життєвий цикл зернових рослин починається з формування зиготи, однак вікові періоди прийнято визначати з моменту проростання насіння. Тому зазвичай першим періодом розвитку визначається стан проростка. На відміну від наступних вікових періодів зародки не живляться автотрофно, а використовують запаси поживних речовин насіння. Стан проростків характеризується також тим, що в цей період всі органи – корені, листя, зачаткове стебло – є зародковими, утвореними за рахунок речовин материнської рослини та насіння.

На першому етапі органогенезу формування пагона починається з утворення ініціальних клітин промеристеми. Із ініціальних клітин формується конус наростання з первинними зачатками органів майбутнього пагона. Просунення пагона у ґрунті зумовлене розтягненням клітин. Для захисту зародкового листя при просуванні пагона в щільному ґрунті у злаків служить колеоптіль – перший видозмінений лист. Оскільки живлення відбувається за рахунок накопичених запасів ендосперму, тому світлові умови на цей період практично не впливають. На цьому етапі проростки дуже чутливі до зміни навколишнього середовища. Так, сильна дія стресових факторів на рослину у цей період призводить до утворення різних аномалій розвитку та видозмін.

**Метою** дослідження є аналіз блоку розробленої моделі періоду розвитку зернових культур від посіву до сходів, який описує динаміку росту пагона, а також викладення отриманих результатів моделювання впливу агрометеорологічних умов на інтенсивність даного процесу, час появи сходів та чутливості моделі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день відома велика кількість моделей розвитку різних культур. Проблемою прогнозування урожайності в тій чи іншій мірі займаються науковці всіх країн з розвинутим сільським господарством. Найбільші досягнення в цьому мають Сполучені Штати Америки та Європейська Комісія. В Україні також було проведено низку досліджень, на основі яких розроблено статистично-біологічні моделі прогнозування урожайності сільськогосподарських культур. Ряд вчених займалися моделюванням врожаїв саме зернових культур, зокрема, А.М. Польовий, П.В.Дмитренко, О.М. Дрозд, В.С. Антоненко та інші [1, 2, 5, 6]. Такі моделі імітують ріст та розвиток рослин під впливом широкого ряду факторів навколишнього середовища.

Більшість моделей ранніх етапів розвитку існують як складові блоки моделей «погода – врожай», але виділяються і деякі самостійні моделі. Моделюванням періоду розвитку від висіву до сходів займалися як вітчизняні, так і зарубіжні автори [8, 9, 10, 11].

Моделі можуть враховувати широкий спектр факторів навколишнього середовища, що впливають на проростання, хоча існують і простіші моделі, які враховують вплив лише кількох факторів. Такі моделі є простішими у застосуванні, але часом поступаються у точності багатфакторним моделям. Однак не можна однозначно

визначити, які з них краще застосовувати на практиці, адже всі вони мають низку переваг та недоліків.

Як вхідну інформацію моделі зазвичай використовують параметри ґрунту (його вологість, температуру, водний потенціал тощо) та посівного матеріалу (масу та розмір, вологість, водний потенціал, проникність оболонки насіння тощо). Результатом розрахунків моделей є строки та повнота появи сходів.

#### Результати дослідження та їх аналіз.

Модель створена на основі існуючих моделей формування сходів [1, 4, 5, 7] з внесенням певних модифікацій.

На першому етапі моделі описується лише поглинання води насінням. З того моменту, коли рівень води зернівки досяг певного критичного значення (*crit 1*), починається також розрахунок швидкості гідролізу запасного білка, крохмалю, дихання зародка та ендосперму. Коли вологість насіння досягає наступного критичного значення (*crit 2*), починається ріст проростка (органу проростаючого насіння, який в свою чергу складається із зачатків корінця та пагона) і замість дихання зародка вже враховується дихання проростка. Надалі вологість насіння залишається незмінною, тому на цьому етапі припиняється її розрахунок. Визначається швидкість розподілу азоту і вуглецю та накопичення сухої маси осьовими органами. Для того, щоб відмітити момент появи сходів, паралельно обчислюється довжина пагона. Розрахунок припиняється, коли його довжина дорівнює глибині закладення насіння.

Речовини, які утворилися в результаті гідролізу, використовуються на дихання зародка та ендосперму. Слід зазначити, що зародок дихає значно інтенсивніше, ніж ендосперм (10% від інтенсивності дихання зародка) [3]. Коли вологість насіння досягла певного критичного значення, відбувається запуск ростових процесів у насінні. Починає розвиватися проросток, який складається з кореня та пагона (колеоптиля). Утворені в результаті гідролізу речовини, що залишилися після затрат на дихання, використовуються на накопичення сухої маси та подовження колеоптиля та зародкових коренів [7].

Динаміку накопичення сухої маси проростком можна описати таким чином:

$$\frac{dm_{sp(r)}}{dt} = \left( \gamma \frac{dC_{end}^{RES}}{dt} + \eta \frac{dN_{end}^{RES}}{dt} \right) - \frac{dR_{sp(r)}}{dt}, \quad (1)$$

де  $\frac{dm_{sp(r)}}{dt}$  – швидкість накопичення сухої маси пагоном (корнем);  $\frac{dC(N)_{end}^{RES}}{dt}$  – швидкість гідролізу вуглецю (азоту);  $\gamma$  і  $\eta$  – коефіцієнти для перерахунку вуглецю та азоту в органічну речовину;  $\frac{dR_{sp(r)}}{dt}$  – дихання пагона (кореня). На основі проведених лабораторних експериментів встановлено, що частка колеоптиля в проростку протягом періоду від початку росту осьових органів до появи сходів в середньому складає 40 %.

Пагін являє собою циліндр постійного радіуса. Швидкість подовження колеоптиля описана як функція накопичення його маси із врахуванням механічного опору ґрунту, що визначається щільністю ґрунту  $\rho_{soil}$  та його вологістю

$$\frac{dH_{sp}}{dt} = \exp\left(\frac{dm_{sp}}{dt} \frac{1}{\rho_{sp}}\right) \frac{1}{\pi r_{sp}^2} k_{sp}(\rho_{soil}) k_{sp}(W_{soil}), \quad (2)$$

де  $\frac{dH_{sp}}{dt}$  – швидкість росту пагона в довжину;  $\rho_{sp}$  – питома щільність рослинної маси пагона;  $r_{sp}$  – радіус основи пагона;  $k_{sp}(\rho_{soil})$  – функція впливу щільності ґрунту на

ріст пагона;  $k_{sp}(W_{soil})$  – функція впливу вологості верхніх шарів ґрунту на подовження пагону.

Коли довжина пагона дорівнює глибині закладення насіння, пагін досягає поверхні землі – спостерігаються сходи. Пагін припиняє свій ріст, а крізь верхівку колеоптиля проривається перший лист.

Описана модель була реалізована на ПК за допомогою програми Microsoft Office Excel. З метою ідентифікації параметрів моделі була обрана кукурудза. Частина параметрів була отримана в результаті проведення експерименту з пророщування насіння кукурудзи у лабораторних умовах. Однак більшість параметрів були визначені шляхом проведення аналізу наявних у літературі даних, а також за допомогою оптимізації та ручної добірки.

На рисунку 1 представлені результати лабораторного експерименту, який описує вплив температури ґрунту на глибині закладення насіння на інтенсивність подовження колеоптиля насіння кукурудзи. Слід зазначити, що якщо температура протягом всього періоду становить 22 °С, то колеоптіль почне рости вже за 2 доби після висіву та досягне глибини закладення за 6 діб. Однак за температури 12°С ріст почнеться лише за тиждень, а сходи з'являться за 18 діб.

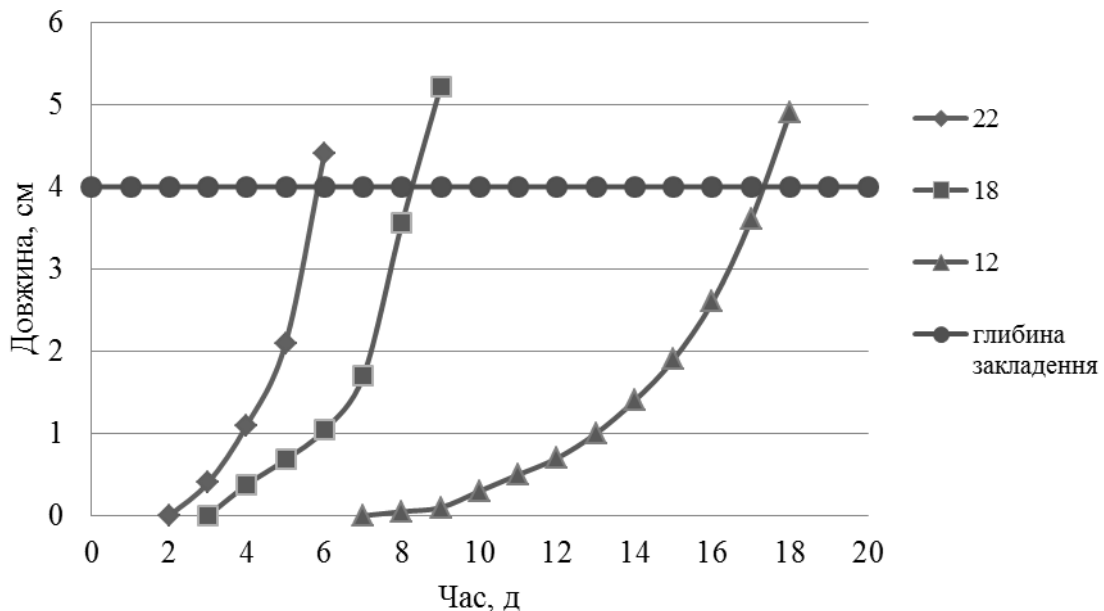


Рис. 1. – Вплив температури ґрунту (12 °С, 18 °С та 22 °С) на швидкість подовження пагона (результати лабораторного експерименту).

Визначено чутливість моделі до зміни параметрів навколишнього середовища. У якості кроку в часі обрано одну добу. Розглядався шар суглинкового ґрунту товщиною 5 см з найменшою вологоємністю 10 мм. Оптимальна вологість ґрунту становить 7 мм.

Оскільки температура відіграє одну з найголовніших ролей під час проростання та розвитку рослин, тому не викликає сумнівів необхідність першочергового проведення аналізу чутливості до зміни даного параметра. Отже, було проведено визначення чутливості моделі до зміни температури ґрунту на тлі оптимальної вологості ґрунту, а також збереження оптимальних параметрів моделі. Обрано діапазон температур ґрунту від 10 °С, оскільки це – біологічний нуль кукурудзи, при якому припиняється розвиток рослини, до 24 °С. Динаміка визначалася через 1 °С (рис.2).

Зниження інтенсивності подовження пагона зі зменшенням температури відбувається поступово. У випадку, коли глибина закладення насіння становить 4 см, а щільність ґрунту  $1,2 \text{ г/см}^3$ , то в межах найбільш сприятливої температури ( $21 - 24 \text{ }^\circ\text{C}$ ) сходи з'являться за 6 діб, при температурі  $19$  та  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  – за 8 діб. Якщо впродовж всього періоду температура становила  $17 - 18 \text{ }^\circ\text{C}$ , то появу сходів слід очікувати за 9 діб, при  $16 \text{ }^\circ\text{C}$  – за 10 діб та при  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  – за 12 діб. Однак за рівня температури  $14 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ , колеоптіль досягне поверхні лише за 14 та 16 діб відповідно, при  $12 \text{ }^\circ\text{C}$  – за 20 діб. В ході експерименту встановлено, що якщо температура ґрунту менша за  $12 \text{ }^\circ\text{C}$ , то пагін загине, так і не досягнувши земної поверхні.

Оскільки за умовну глибину закладення насіння обрано 4 см [4], тому довжина колеоптиля, яка перевищує дане значення, не береться до уваги, оскільки вважається, що колеоптіль досяг поверхні і на його верхівку потрапляє сонячне світло, починається фотосинтез і рослина переходить на інший рівень живлення.

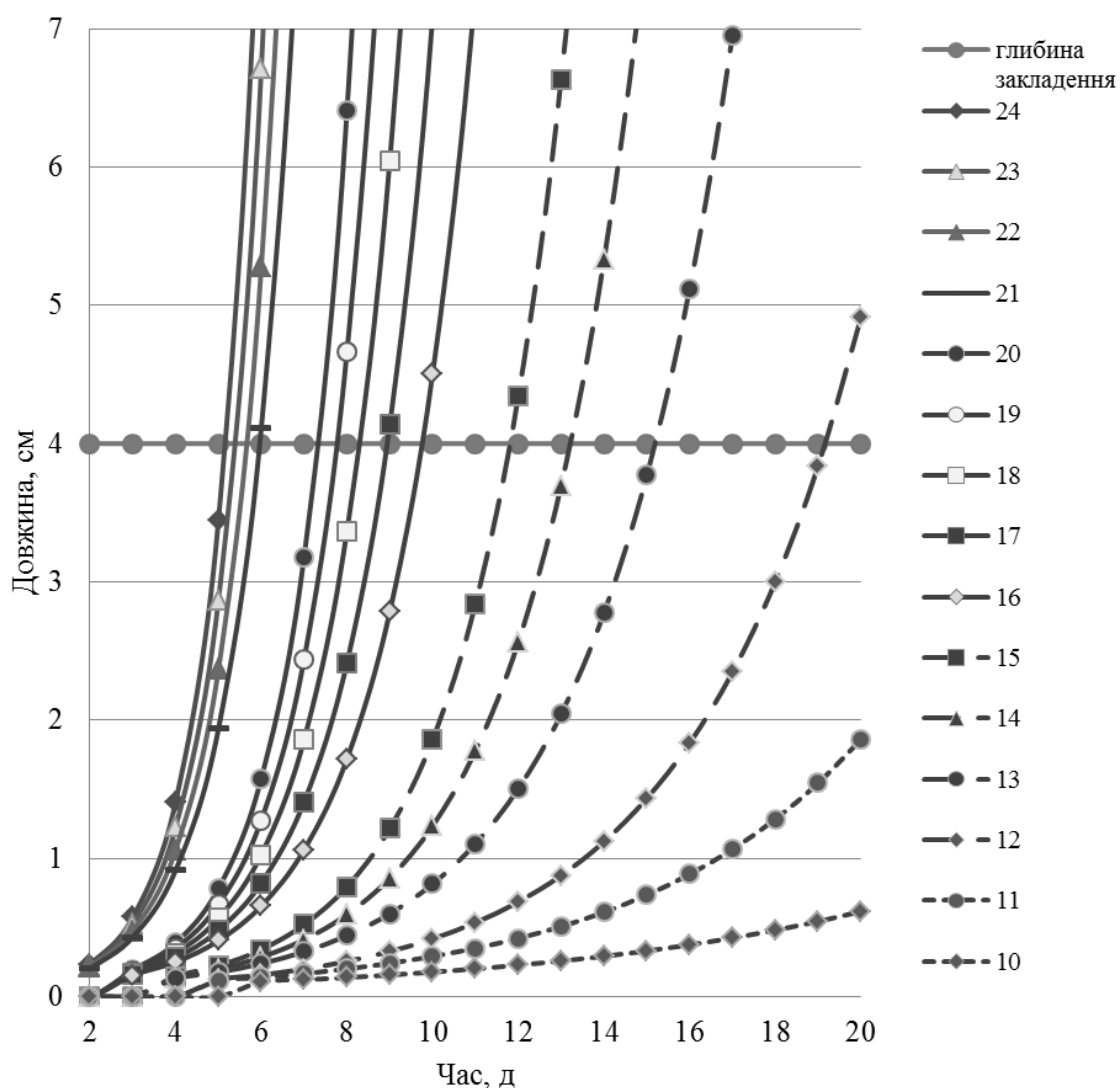


Рис. 2. – Чутливість моделювання подовження колеоптиля до зміни температури ґрунту ( $10 - 24 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Було проведено аналіз чутливості моделі до зміни вологості ґрунту. Визначення проводилися в інтервалі від 1 до 10 мм, через 1 мм вологості на тлі оптимальної температури  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  та щільності ґрунту  $1,2 \text{ г/см}^3$  (рис. 3). У випадку, коли вологість



грунту знаходиться у межах 6 – 10 мм, подовження колеоптиля відбувається досить синхронно і сходи з'являються за 6 діб. Зі зниженням вологості до 4 – 5 мм період появи сходів подовжується до 7 – 8 діб і при вологості 3 мм становить 9 діб. При вологості, нижчій за 3 мм, насіння не в змозі накопичити достатньо вологи для запуску ростових процесів, тому вологість ґрунту 1 – 2 мм не може впливати на подовження колеоптиля.

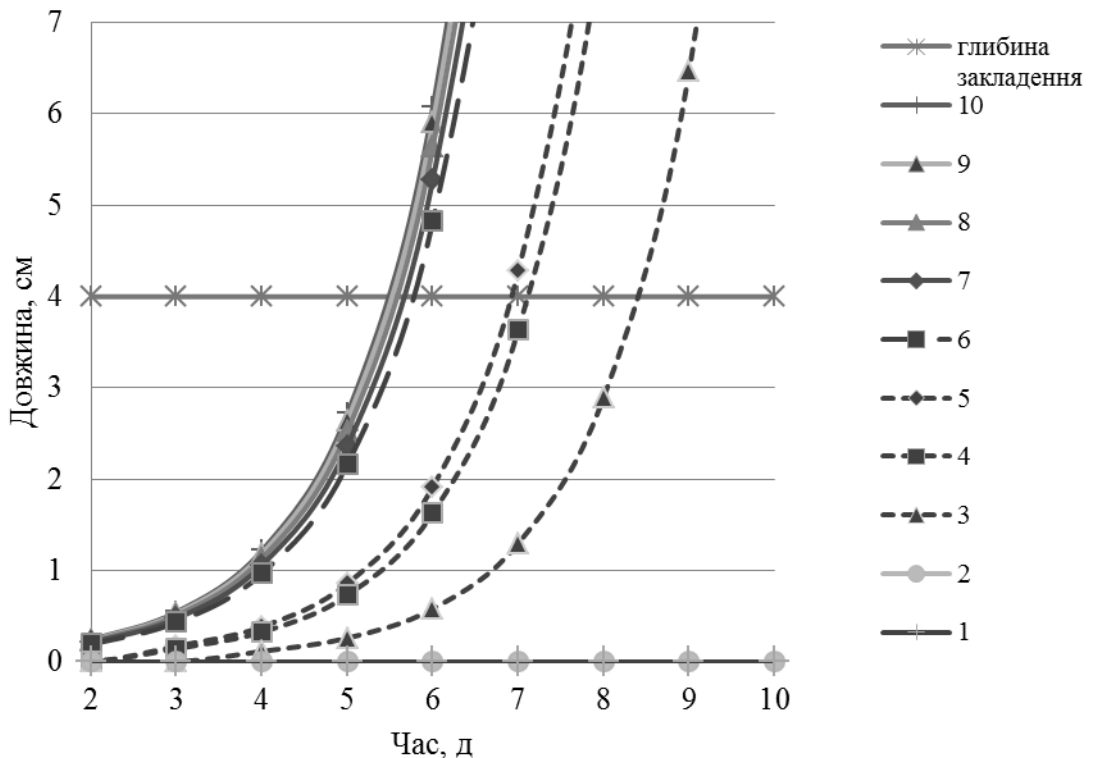


Рис. 3 – Чутливість моделювання подовження колеоптиля до зміни вологості ґрунту (1 – 10 мм).

Дослідження чутливості моделі до зміни щільності ґрунту було проведено в інтервалі 0,8 – 1,4 г/см<sup>3</sup> через 0,1 г/см<sup>3</sup> за умови оптимальної вологості та температури ґрунту (рис. 4). Щільність ґрунту сповільнює процес подовження пагона. Так, за найменшої щільності у 0,8 – 0,9 г/см<sup>3</sup> сходи можуть з'явитися за 5 діб, 1,0 – 1,3 г/см<sup>3</sup> – за 6 діб та щонайменше за тиждень у випадку щільності 1,4 г/см<sup>3</sup> та більше.

Також було проведено аналіз чутливості до зміни початкових значень посівного матеріалу та внутрішніх параметрів моделі. В ході дослідження початкова вологість насіння змінювалася на 0,01 сухої маси в інтервалі від 0,11 до 0,2, оскільки зазвичай під час висіву вологість насіння становить близько 0,14 – 0,16 сухої маси насіння. Встановлено, що модель чутлива до зміни даного параметра, слід зазначити, що сухіше насіння буде рости швидше, однак, у кожному випадку сходи з'являться у межах однієї доби.

Модель чутлива також до зміни початкової маси насіння. Для дослідження була обрана маса однієї насінини у інтервалі від 0,23 г до 0,32 г, через 0,01 г. Оскільки насінини з більшою масою мають значніші запаси поживних речовин для підтримки та росту, тому подовження їх пагонів відбувається інтенсивніше. Так колеоптиль насінин з масою 0,27 – 0,29 г досягне поверхні вже за 6 діб, а з масою 0,23 – 0,26 г – лише за 7 діб. Однак, коли маса насінини перевищує 0,3 г, вона не здатна накопичити необхідну кількість вологи, тому подальший ріст не відбудеться.

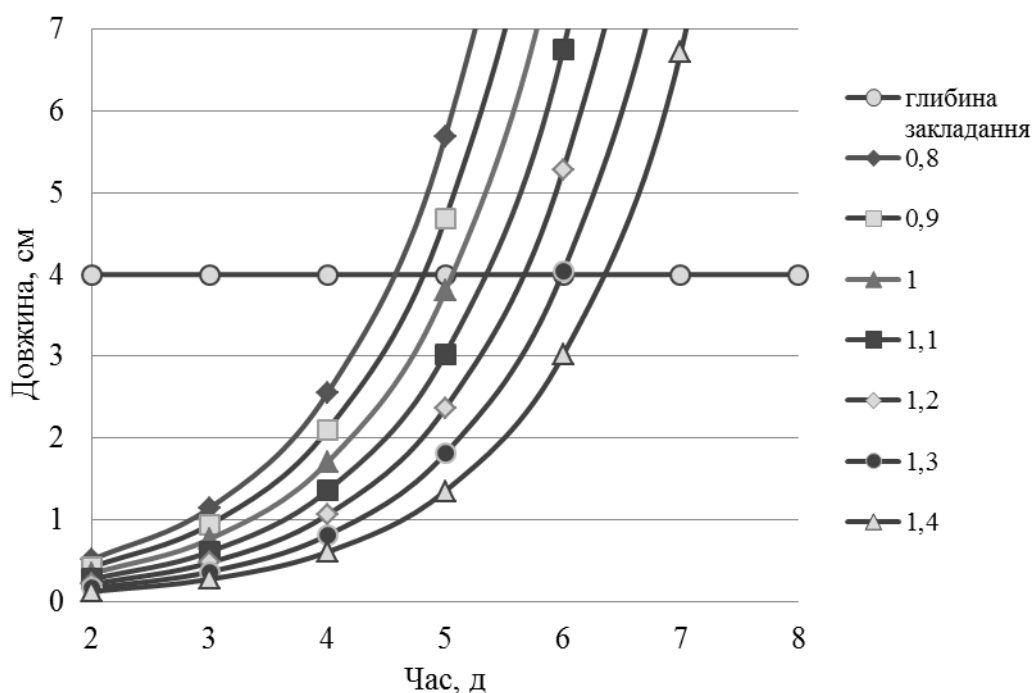


Рис. 4 – Чутливість моделювання подовження колеоптиля до зміни щільності ґрунту (0,8 – 1,4 г/см<sup>3</sup>).

У низці чисельних експериментів досліджувався вплив зміни агрометеорологічних умов на швидкість подовження колеоптиля.

За умови, що вологість становить 7 – 9 мм у шарі ґрунту 0 – 5 см, а температура протягом усього періоду зберігається на рівні 22 °С, проросток почне рости вже за 2 доби. У випадку недостатньої зволоженості цей період складатиме 3 доби. Зі зниженням температури початок росту затримується і може початися через 3 – 5 діб у межах оптимального зволоження ґрунту та через 7 діб при недостатньому.

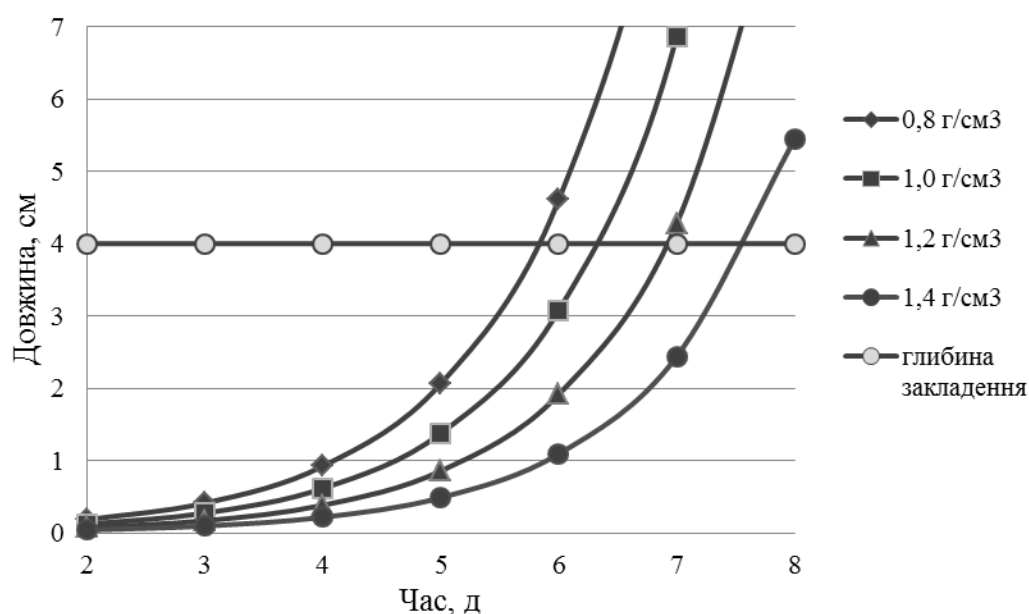


Рис. 5 – Вплив щільності ґрунту на подовження колеоптиля в умовах оптимальної температури (22 °С) та недостатніх запасів вологи (5 мм).

Зниження запасів води у ґрунті на тлі оптимальної температури 22 °С призводить до затримання появи сходів (рис. 5). Так у випадку щільності ґрунту 0,8 г/см<sup>3</sup> пагін досягне поверхні за 6 діб, 1 – 1,2 г/см<sup>3</sup> – за 7 діб та за 8 діб, якщо щільність становить 1,4 г/см<sup>3</sup>.

Зниження температури ґрунту в поєднанні з недостатнім зволоженням значною мірою обмежує появу сходів, виникає загроза загибелі молодих рослин (рис. 6). Якщо щільність ґрунту більша за 1 г/см<sup>3</sup>, то запаси ендосперму будуть вичерпані ще до появи сходів, і колеоптиль так і не досягне поверхні. Однак, якщо запаси води оптимальні та перевищують оптимальні, то пагін досягне поверхні за 15 – 16 діб, коли щільність становить 0,8 – 1 г/см<sup>3</sup> та 18 – 20 діб зі збільшенням щільності ґрунту (рис. 7).

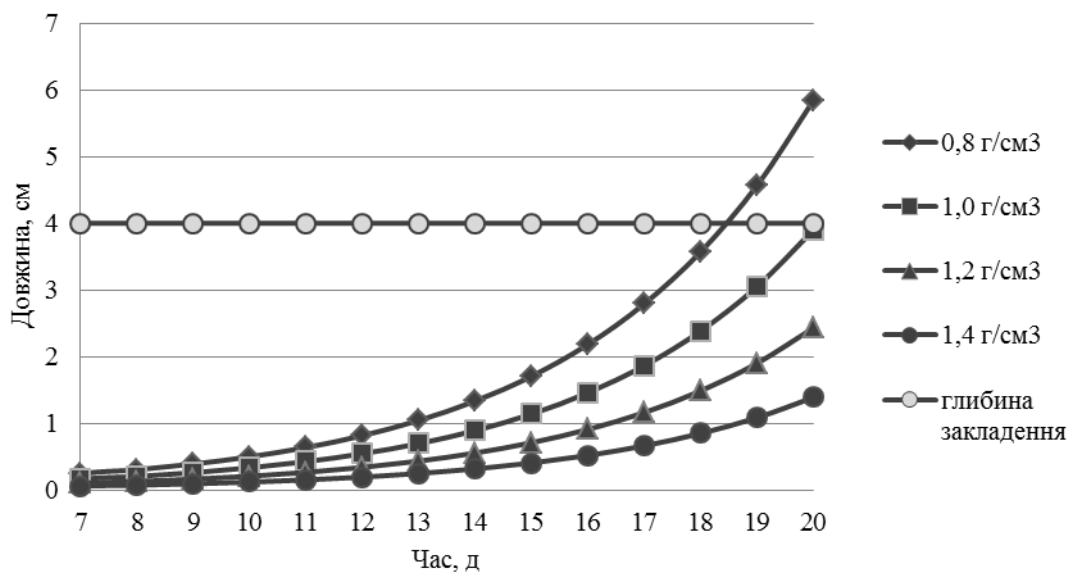


Рис. 6 – Вплив щільності ґрунту на подовження колеоптиля в умовах зниженої температури (12 °С) та недостатніх запасів води (5 мм).

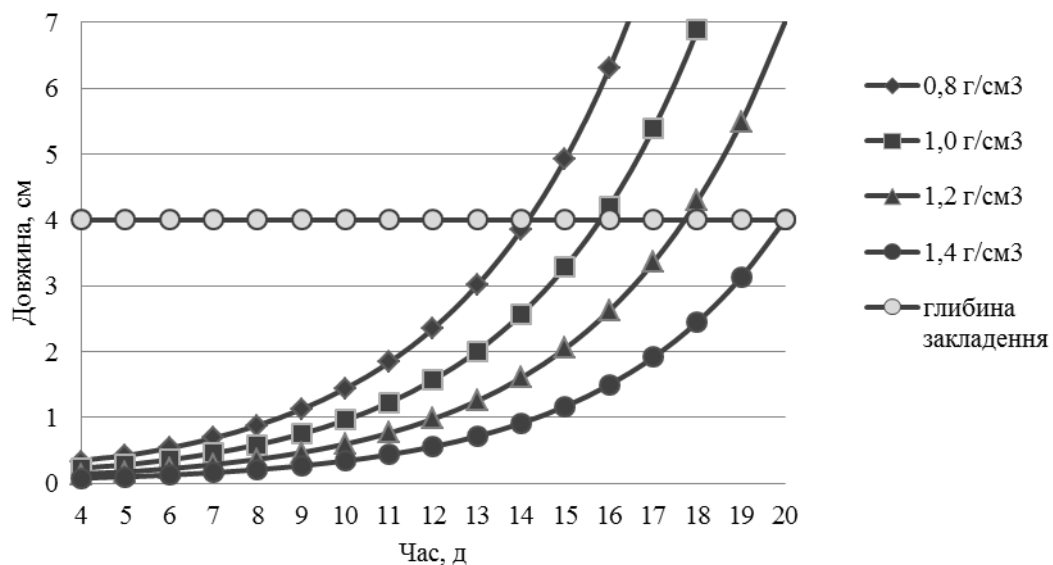


Рис. 7 – Вплив щільності ґрунту на подовження колеоптиля в умовах зниженої температури (12 °С) та при запасах води 9 мм.

**Висновки.** Розроблена динамічна модель формування сходів зернових культур, яка дозволяє визначити дату появи сходів, польову схожість, розподіл кількості рослин з різною глибиною закладення насіння та кількість рослин на одиницю площі. Розглянутий блок моделі описує ріст та динаміку подовження колеоптиля, а також появу сходів.

У чисельних експериментах встановлена висока чутливість швидкості подовження колеоптиля до температури ґрунту, а також до щільності ґрунту.

За оптимальних умов навколишнього ґрунтового середовища насіння накльовується вже за 2 доби, при недостатній зволоженості цей період подовжується до 3 діб. Зі зниженням температури, через те, що процес накопичення вологи сповільнюється, ріст почнеться за 3 – 5 діб, а на тлі недостатнього зволоження – через 7 діб.

В умовах збереження оптимального ґрунтового середовища, лімітуючим фактором для появи сходів є збільшення щільності ґрунту. Так, якщо при мінімальному значенні щільності  $0,8 \text{ г/см}^3$  колеоптиль може досягти поверхні ґрунту вже на 5-у добу після посіву, то при щільності в  $1,4 \text{ г/см}^3$  сходи з'являться тільки через 7 діб. Зі зниженням температури ґрунту інтенсивність проростання насіння також зменшується. Тому при температурі  $18^\circ \text{C}$  сходи з'являться через 7 – 10 діб, а при  $12^\circ \text{C}$  – мінімум через 16 діб після висіву.

#### Список літератури

1. Антоненко В.С. Динамическое моделирование роста, развития и формирования продуктивности озимой пшеницы. – К.: «АртЭк», 2002. – С.64.
2. Немченко О. А., Мусаменко Л. И. Моделирование роста и метаболизма растений на ранних этапах органогенеза // Физиология и биохимия культурных растений. – 1982. – Т. 14, №5. С.439 – 445.
3. Носатовский А.И. Пшеница. – М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1950. – 408 с.
4. Павлова В.Н. Моделирование ростовых процессов в период прорастания зерна в рамках моделей «погода – урожай»//Труды ВНИИСХМ. – 1983. – Вып. 8. – С. 28 – 36.
5. Польовий А.Н. Динамічна модель проростання насіння та формування сходів зернових культур // Український гідрометеорологічний журнал. – 2008. – №3. – С. 75 – 84.
6. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Тонаж А.Г. Моделирование продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2006. – 396 с.
7. Строганова М.А., Коровин А.И., Полевой А.Н. Динамическая модель расходования запасов эндосперма семян зерновых культур в процессе прорастания и в период до появления всходов//Сельскохозяйственная биология. – 1983. - №1. – С. 126 – 135.
8. An Index Model for Predicting Seed Germination and Emergence. David M. Alm et.al. Weed Technology, Vol. 7, No. 3 (Jul. - Sep., 1993), pp. 560-569.
9. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. P.K. Aggarwal et al. / Agricultural Systems 89 (2006), 1–25.
10. Modeling seedling emergence. F. Forcella et al. / Field Crops Research 67 (2000) 123-139.
11. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. T. Palosuo et al. / Europ. J. Agronomy 35 (2011) 103 – 114

#### **Моделирование роста и развития колеоптиле зерновых культур в период «посев – всходы». Синицина В.В.**

*Рассматривается развитие и рост колеоптиле зерновых культур. Описаны особенности моделирования развития побега в период от посева до всходов. Представлены результаты проведенного моделирования влияния агрометеорологических условий на удлинение колеоптиле и время появления всходов.*

*Ключевые слова:* семя, эндосперм, зародыш, колеоптиле, проросток, росток, рост, всходы.

#### **Modeling of grain crops coleoptile growth and development during the period from sowing to emergence. Sinitsyna V.**

*Review of existing grain crop grow models of period from sowing to germination and the algorithm of developed dynamic model that describes the physiological and biochemical processes occurring in seeds during the period are discussed. The structure and the scheme of the model were described in details.*

*Keywords:* seed, endosperm, embryo, coleoptile, seedling, sprout, growth, emergence.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЖОНСОНА ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ РЯДОВ СКОРОСТИ ВЕТРА У ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

*Рассмотрена возможность применения закона распределения Джонсона для выравнивания рядов скорости ветра у поверхности земли с учетом их годового и суточного хода в районе морской гидрометеорологической станции Ильичевск-порт.*

**Ключевые слова:** распределение Джонсона, ряды скорости ветра, эксцесс, асимметрия.

**Введение.** Для выравнивания распределений скорости ветра, по мнению К. Брукса, трудно подобрать подходящее теоретическое распределение [2, 3, 8]. В этом случае, чаще всего, применяют распределение Шарлье – типа А, Релея, Вейбулла (тип 3) и Джонсона. Законы Максвелла и Релея достаточно хорошо описывают распределение скорости ветра на высотах, но для рядов скорости ветра у поверхности земли пригодны лишь в редких случаях. Радикальный путь сглаживания наиболее важной части интегральных кривых распределения предложен Анапольской Л. Е. и Гандиным Л. С. [1].

**Целью исследования** является подбор подходящего теоретического распределения для выравнивания рядов скорости ветра у поверхности земли на ст. Ильичевск-порт.

**Материалы исследования.** Исходными данными служат ежемесячные четырехсрочные метеорологические наблюдения (00, 06, 12, 18 UTC) за скоростью и направлением ветра в период 1981–1990 гг. на станции Ильичевск-порт.

**Результаты и методы исследования.** Анализ качества исходных материалов и проверка однородности рядов осуществлены с помощью параметра Стьюдента. Неоднородность чаще всего возникает из-за переноса флюгера, смены датчиков измерений застройки вблизи станции жилыми или промышленными объектами, вырубки деревьев, близости крупных насаждений деревьев, а также из-за смены наблюдателей. Важным также является положение самой станции [4, 7].

Морская гидрометеорологическая станция (МГС) Ильичевск находится на берегу Сухого лимана на расстоянии 25 км к юго-востоку от Одессы. Русло Сухого лимана, в южной части которого расположен порт Ильичевск, ориентировано с юго-востока на северо-запад [5]. Ветер с моря от востока-северо-восток до юго-юго-востока и лимана от северо-северо-запада до северо-северо-востока свободно проникает на МГС, не встречая препятствий. В связи с тем, что МГС находится на одной из площадок западного склона лимана, рельеф которого относительно пологий, то скорости ветра от юго-запада до северо-северо-запада по-видимому занижены.

Решение задачи выбора распределения начинается с выявления и отбрасывания из исходной выборки неоднородных членов ряда. Для проверки соответствия эмпирического распределения теоретическому используется критерий Пирсона « хи-квадрат » ( $\chi^2$ ) на 5%-ном уровне значимости. Причем, уровень значимости - это малая вероятность совершить ошибку первого рода, т.е. отвергнуть правильную гипотезу [10]. Теоретическое распределение  $\chi^2$  хорошо известно и затабулировано. Если гипотетическое распределение сильно отличается от данного (в нашем случае это распределение Джонсона), то  $\chi^2$  велико. Когда  $\chi^2$  больше определённых пределов, делают вывод, что наблюдаемое распределение значительно отличается от гипотетического. Доверительные границы критерия  $\chi^2$  зависят от числа степеней свободы  $n$ . Оно равно числу градаций  $m$  минус число ограничений. Ограничение, как правило, состоит в том, что общее число отдельных случаев в гипотетическом распределении должно быть таким же, как и число отдельных случаев в выбранном распределении.

Широкое распространение физико-статистических методов прогноза, базирующихся на построении регрессионных моделей, ставит задачу совершенствования исследований статистических характеристик метеорологических величин и явлений, выступающих в качестве предикторов (характеристики состояния атмосферы) и предиктантов (прогнозируемой величины). Знание особенностей распределения необходимо также для решения многих задач, таких как контроль достоверности наблюдений, расчетов выбросов и других. Наиболее просто решаются задачи статистического анализа при нормальном распределении рассматриваемых величин. Поэтому, даже если гипотеза о нормальности отвергается, все равно делаются попытки распространения выводов, полученных для гауссова распределения, на реальные данные. Так поступают, например, когда кривая распределения имеет только одну хорошо выраженную моду. Однако при существенных отличиях кривой распределения от гауссовой такой подход может привести к значительным погрешностям результатов анализа.

Наиболее эффективным способом преодоления трудностей, связанных с аппроксимацией сложных кривых распределения, является использование логарифмического преобразования, более общим является преобразование Н. Л. Джонсона [9]. Выравнивание статистических рядов по логарифмическому закону с помощью преобразования Джонсона несколько сложнее, так как выравнивающая функция зависит от трёх параметров. Зато данное преобразование позволяет получить целую систему функций плотности, которые могут быть использованы для описания более широкого класса статистических распределений. Джонсон предлагает для превращения распределения в нормальное ввести соотношения, содержащие логарифмическую функцию. Использование указанных логарифмических преобразований приводит к большому многообразию форм кривых и создает почти такую же обширную систему, как и система кривых Пирсона, но они отличаются более простой процедурой выравнивания и обеспечивают обширное многообразие форм кривых с помощью трёх семейств:  $S_L$ ,  $S_B$ ,  $S_U$ . Располагая оценками параметров распределения Джонсона, можно привести анализируемую реализацию к виду, не противоречащему нормальному закону распределения [6].

В основе эмпирических распределений Джонсона лежит преобразование исследуемой случайной величины  $x$  с помощью следующего соотношения:

$$z = \gamma + \eta \tau(x, \varepsilon, \lambda), \quad (1)$$

$$\eta > 0; \quad -\infty < \varepsilon < \infty; \quad -\infty < \gamma < 0,$$

где  $z$ - случайная величина, распределённая по нормальному закону  $N(0,1)$ ;

$\varepsilon, \lambda$  - параметры распределения Джонсона, определяющие пределы, в которых заключены значения величины  $x$ ;

$\eta, \gamma$  - параметры Джонсона, определяющие форму кривой распределения;

$\tau$  - некоторая произвольная функция, для которой Джонсон предложил 3 формы, приводящие соответственно к трём семействам распределения  $S_L, S_B, S_U$ :

$$\tau_1 = \ln \frac{x - \varepsilon}{\lambda}, \quad x \geq \varepsilon; \quad (2)$$

$$\tau_2 = \ln \frac{x - \varepsilon}{\varepsilon + \lambda - x}, \quad \varepsilon \leq x \leq \varepsilon + \lambda; \quad (3)$$

$$\tau_3 = Azsh\left(\frac{x - \varepsilon}{\lambda}\right), \quad -\infty < x < \infty. \quad (4)$$

Выбор подходящего семейства распределений осуществляется на основе анализа оценок центральных моментов распределения случайной величины  $x$ . Наиболее часто в практике обработки данных встречается  $S_B$  – семейство (3), используемое для случайных процессов, ограниченных снизу и сверху. Плотность распределения для этого семейства описывается выражением

$$P(x) = \frac{\eta}{\sqrt{2\pi}} \frac{\lambda}{(x-\varepsilon)(\varepsilon+\lambda-x)} \cdot e^{\frac{z^2}{2}}, \quad (5)$$

где  $z$  определяется с помощью (1).

Прежде, чем приступить к проверке применимости распределения Джонсона для выравнивания рядов скорости ветра по данным метеорологической станции Ильичевск-порт, исходные ряды наблюдений исследованы с целью проверки их соответствия нормальному закону распределения. В качестве статистических характеристик использованы (табл. 1) средние значения скорости ветра ( $\bar{x}$ ), среднеквадратические отклонения ( $\sigma_x$ ), коэффициенты асимметрии ( $A$ ) и эксцесса ( $E$ ).

Рассмотрим статистические параметры скорости ветра по ст. Ильичёвск-порт. Значения средней скорости ветра  $\bar{x}$  варьируют от 2,3 м с<sup>-1</sup> (май 00 UTC) до 4,9 м с<sup>-1</sup> (декабрь 12 UTC). Суточный ход  $\bar{x}$  хорошо выражен в летние месяцы, к примеру, в июне он колеблется от 2,5 до 4,1 м с<sup>-1</sup> в 00 и 12 UTC соответственно. В холодное полугодие среднесуточная амплитуда более сглажена. Скорость ветра наиболее изменчива в Ильичёвске в зимнее время, максимальное  $\sigma_x$  составляет 2,6–2,8 м с<sup>-1</sup> в декабре, минимальное – 2,37–2,54 в январе, а по срокам она, как и следовало ожидать, наиболее изменчива днем. В переходные сезоны и летом распределение скорости ветра резко асимметрично и отличается от распределений в зимнее время меньшими значениями среднеквадратического отклонения – 1,30 – 2,10 в июле (00 и 12 UTC).

Так как скорость ветра имеет часто достигаемый нижний предел, распределение ветра резко и положительно асимметрично. Значение асимметрии колеблется от 0,52 (сентябрь 18 UTC) до 1,24 (сентябрь 06 UTC). Для распределения скорости ветра в порту Ильичёвск характерен умеренный и сильный эксцесс как положительный, так и отрицательный – 1,100 (сентябрь 06 UTC) и -0,370 (март 18 UTC). Анализ коэффициента вариации ( $C$ ) показал, что максимум 0,680 наблюдается в октябре 00 UTC, а минимум 0,486 – в апреле 12 UTC. В среднем значения колеблются около 0,600. Значение ошибки среднеквадратического отклонения  $\sigma_\sigma$  уменьшается от января к июлю и колеблется от 0,11 до 0,05, а с июля по декабрь наблюдается более сложный ход этой статистики. Ошибки асимметрии  $\sigma_A$  для всех месяцев первой половины года, кроме февраля, равны 0,14, а для второго полугодия они составляют 0,04. Ошибки эксцесса  $\sigma_E$  не превышают 0,28 – 0,29 с января по июнь, а в последующие месяцы равны 0,03. По данным табл. 1 можно увидеть, что среднее значение скорости и среднеквадратическое отклонение постепенно увеличиваются от июля к декабрю. Максимальных величин эти параметры достигают в декабре 4,9 и 2,80 соответственно. В суточном ходе отмечается тенденция к росту значений  $\bar{x}$  и  $\sigma_x$  в дневные часы (12 UTC). К сроку 18 UTC наблюдается уменьшение этих параметров. Максимальные значения асимметрии 1,24 приходятся на утренний срок наблюдений (06 UTC), а минимальные – в дневной (12 UTC).

Ошибка среднеквадратического отклонения рассчитана по формуле:

$$\sigma_\sigma = \frac{0,5\sigma\sqrt{2+A}}{\sqrt{N}}, \quad (6)$$

коэффициента асимметрии

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{6}{N}}, \quad (7)$$

Таблица 1 – Значения  $\bar{x}$ ,  $\sigma_x$ , А, Е, С,  $\sigma_\sigma$ ,  $\sigma_A$ ,  $\sigma_E$  для скорости ветра на ст. Ильичёвск-порт. 1981-1990 гг.

Месяц	Срок	Статистические параметры							
		$\bar{x}$	$\sigma_x$	А	Е	С	$\sigma_\sigma$	$\sigma_A$	$\sigma_E$
Январь	00	4,4	2,54	0,87	0,300	0,577	0,10	0,14	0,28
	06	4,6	2,54	0,91	0,390	0,552	0,10	0,14	0,29
	12	4,8	2,77	0,92	0,130	0,577	0,11	0,14	0,28
	18	4,2	2,37	0,77	0,002	0,564	0,10	0,14	0,29
Февраль	00	4,3	2,59	0,87	0,070	0,602	0,11	0,15	0,29
	06	4,3	2,69	0,89	-0,040	0,626	0,11	0,15	0,29
	12	4,8	2,65	0,75	-0,150	0,552	0,11	0,15	0,29
	18	4,5	2,62	0,72	-0,170	0,582	0,11	0,15	0,29
Март	00	3,8	2,46	0,83	-0,005	0,647	0,10	0,14	0,28
	06	4,1	2,70	0,85	0,110	0,658	0,11	0,14	0,28
	12	4,8	2,55	0,68	-0,150	0,531	0,10	0,14	0,28
	18	3,8	2,37	0,53	-0,370	0,623	0,09	0,14	0,28
Апрель	00	3,4	2,23	0,94	0,420	0,656	0,09	0,14	0,29
	06	3,7	2,17	0,69	-0,110	0,586	0,09	0,15	0,29
	12	4,3	2,19	0,70	-0,230	0,486	0,08	0,14	0,28
	18	3,6	2,27	0,78	-0,040	0,629	0,09	0,14	0,28
Май	00	2,3	1,33	0,55	0,220	0,578	0,06	0,14	0,28
	06	3,0	1,82	1,10	0,740	0,607	0,07	0,14	0,28
	12	3,9	2,04	0,95	0,510	0,523	0,08	0,14	0,28
	18	2,9	1,77	0,77	0,250	0,610	0,07	0,14	0,28
Июнь	00	2,5	1,37	0,55	0,180	0,548	0,06	0,14	0,29
	06	2,8	1,47	0,60	-0,180	0,525	0,06	0,14	0,29
	12	4,1	2,04	0,67	-0,004	0,498	0,08	0,14	0,28
	18	3,0	1,84	0,95	0,650	0,613	0,07	0,14	0,28
Июль	00	2,5	1,30	0,72	0,400	0,520	0,05	0,04	0,03
	06	2,8	1,40	0,71	0,200	0,500	0,06	0,04	0,03
	12	3,9	2,10	0,12	0,900	0,520	0,08	0,04	0,03
	18	2,8	1,80	0,81	0,400	0,630	0,07	0,04	0,03
Август	00	2,6	1,40	0,62	0,100	0,530	0,05	0,04	0,03
	06	3,0	1,80	0,81	0,500	0,590	0,07	0,04	0,03
	12	3,7	1,60	0,72	-0,100	0,440	0,06	0,04	0,03
	18	2,6	1,30	0,63	0,100	0,500	0,05	0,04	0,03
Сентябрь	00	2,4	1,30	0,72	0,300	0,570	0,05	0,04	0,03
	06	2,9	1,80	1,24	1,100	0,630	0,07	0,04	0,03
	12	3,8	1,90	0,61	3,400	0,700	0,07	0,04	0,03
	18	2,7	1,60	0,52	0,200	0,580	0,06	0,04	0,03
Октябрь	00	3,4	2,30	1,12	0,500	0,680	0,09	0,04	0,03
	06	3,7	2,40	0,91	0,300	0,640	0,09	0,04	0,03
	12	3,6	2,50	0,72	-0,200	0,540	0,02	0,04	0,03
	18	3,4	1,10	0,93	0,200	0,580	0,07	0,04	0,03
Ноябрь	00	3,9	2,40	0,81	0,100	0,610	0,09	0,04	0,03
	06	4,3	2,60	0,82	-0,100	0,600	0,09	0,04	0,03
	12	4,8	2,60	0,50	0,400	0,520	0,02	0,04	0,03
	18	4,2	2,40	0,70	0,400	0,580	0,07	0,04	0,03
Декабрь	00	4,3	2,80	0,91	0,100	0,610	0,11	0,04	0,03
	06	4,3	2,60	0,81	-0,200	0,600	0,11	0,04	0,03
	12	4,9	2,60	0,60	-0,100	0,540	0,10	0,04	0,03
	18	4,4	2,60	0,90	0,000	0,600	0,10	0,04	0,03



коэффициента эксцесса

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{24}{N}}, \quad (8)$$

где  $N$  - объём выборки,  $\sigma_\sigma$ ,  $\sigma_A$ ,  $\sigma_E$  - ошибки среднеквадратического отклонения, коэффициентов асимметрии и эксцесса соответственно.

По месяцам года величина ошибки увеличивается от летних к зимним, а в течение суток отмечается рост  $\sigma_\sigma$  в дневные часы и падение к вечеру на 16 и 2 % соответственно. Изменение ошибок эксцесса не наблюдается в течении всех сроков и составляет 30 %. Отклонение остальных параметров от пятипроцентного уровня значимости не значительны и в целом удовлетворяют точности вычислений. Из вышесказанного можно заключить, что использование нормального закона для сглаживания статистических рядов скорости ветра нецелесообразно. Поэтому в качестве теоретического закона распределения сделаем попытку применить распределение Джонсона.

Проверка на соответствие выравнивания исходных рядов приземной скорости ветра по закону распределения Джонсона даёт хорошие результаты, а параметры этого распределения точно описывают форму и семейство кривых распределения. В качестве примера в табл. 2 приведены параметры распределения Джонсона за первое полугодие. Анализ параметров распределения Джонсона показал, что в большинстве случаев распределение удалось подобрать при  $\varepsilon = -0,6$ . Пределы варьирования этой величины равны  $-0,42 \dots -10,0$  (табл.2). Параметры  $\gamma$  и  $\eta$ , определяющие форму кривой распределения, изменяются в пределах  $0,45 \dots 23,8$  и  $0,94 \dots 6,25$  соответственно. В большинстве случаев  $\gamma$  больше единицы, что свидетельствует о принадлежности кривой распределения к семейству кривых  $S_L$ . К семейству  $S_B$  принадлежат кривые, показывающие распределение ветра за март (06 и 18 UTC), когда  $\gamma$  меньше единицы (рис.1). Для трех сроков (май, 06, 12 и 18 UTC) распределение Джонсона подобрать не удалось даже после корректировки параметров  $\varepsilon$  и других. Для срока 12 UTC распределение бимодальное, что свидетельствует о неподчинении распределению Джонсона даже при дальнейшей корректировке параметров. Для двух остальных сроков мая (00 и 18 UTC) вероятность  $Q$  меньше 1%, т.е. скорость ветра в этом месяце также практически не подчиняется выбранному закону. Анализ табл. 2 показал, что остальные ряды почти все подчиняются распределению Джонсона, кроме января 18 UTC, февраля 18 UTC, июня 18 UTC.

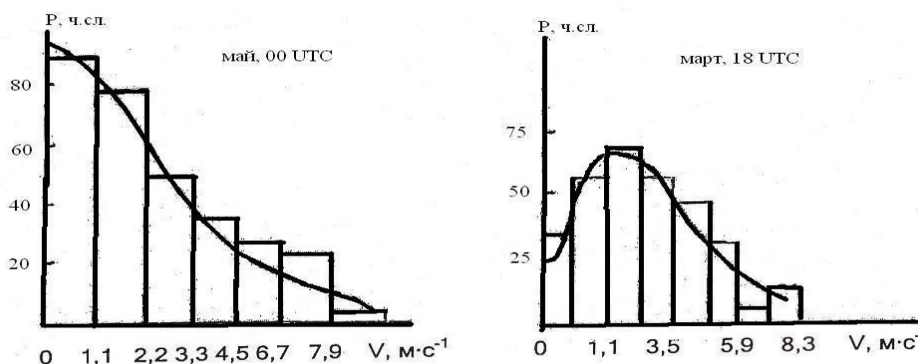


Рис. 1 – Статистическое и теоретическое (по Джонсону) распределения скорости ветра на метеорологической станции Ильичевск-порт

Таблица 2 – Значение параметров распределения Джонсона  $\varepsilon$ ,  $\lambda$ ,  $\eta$ ,  $\chi^2$ ,  $Q$  для скорости ветра на ст. Ильичёвск за первое полугодие 1981-1990 гг.

Месяц	Срок	Параметры				
		$\varepsilon$	$\gamma$	$\eta$	$\chi^2$	$Q\%$
Январь	00	-1,00	12,97	2,42	11,5	2,11
	06	-1,01	0,77	1,35	7,72	5,02
	12	-0,45	1,62	1,77	6,21	10,0
	18	-0,62	2,28	1,43	12,2	0,70
Февраль	00	-0,64	4,53	1,85	10,9	0,44
	06	-0,63	5,31	1,66	11,3	1,00
	12	-0,80	2,75	1,71	9,34	1,15
	18	-0,85	1,32	1,27	11,0	0,90
Март	00	-0,60	3,12	1,36	6,20	10,0
	06	-0,63	0,84	0,99	7,31	6,24
	12	-0,65	1,83	1,26	9,57	2,21
	18	-0,61	0,45	0,94	9,18	2,72
Апрель	00	-10,0	23,8	6,25	6,33	4,21
	06	-0,61	1,06	1,16	13,9	0,33
	12	-0,42	1,28	1,18	5,45	6,61
	18	-0,53	0,87	0,99	10,7	1,30
Май	00	-1,30	3,94	2,25	13,5	0,90
	06	-	-	-	-	-
	12	-	-	-	-	-
	18	-0,55	3,82	1,98	10,3	0,63
Июнь	00	-1,93	9,40	2,57	12,2	1,65
	06	-0,55	0,92	1,20	5,52	1,93
	12	-0,65	1,52	1,60	1,23	5,30
	18	-0,63	12,9	1,89	9,42	0,91

Анализ данных за второе полугодие, позволяет сделать выводы, что при фиксированном значении  $\varepsilon$  (от - 0,6 до - 1,2) величина  $Q$  варьирует от 0,07 до 11,89 %. Это говорит о том, что распределение скорости ветра подчиняется распределению Джонсона. Оценивая значения  $Q$  по месяцам, видно, что в летние месяцы теория Джонсоновского распределения подтверждается лучше, чем в осенние, исключения составляют лишь сроки 15 UTC ноябрь – (12 %) и 09 UTC. Значения  $\lambda$  несколько увеличиваются в утренние часы, что свидетельствует об уменьшении скоростей ветра утром чаще, чем в другие сроки. Параметр  $\lambda$  изменяется в довольно широких пределах от 12,05 (15 UTC, сентябрь) до 84,92 (15 UTC, июль). Причем, масштабы изменения случайной величины  $\lambda$  больше в тёплый период, чем в холодный. Параметр  $\eta$  во всех случаях находится в пределах от 1,0 до 2,5. Параметр  $\gamma$  сильно превышает единицу, что говорит о принадлежности распределения к семейству  $S_L$ . К семейству  $S_B$  относятся кривые, показывающие распределение скорости ветра за 09 UTC, декабрь ( $\gamma = 0,97$ ) и 15 UTC, ноябрь ( $\gamma = 0,97$ ). В целом за полугодие параметр  $\gamma$  варьирует в пределах от 0,41 до 8,87.

Сравнительный анализ параметров этих распределений по различным станциям северо-западного побережья Черного моря позволит выявить ряд закономерностей, учитывающих не только сезонную и суточную изменчивости характеристик ветра, но и

влияние физико-географических условий расположения метеорологических станций на режим ветра у поверхности земли, как представлено в [3].

**Выводы.** Таким образом, проверка применения закона распределения Джонсона для выравнивания рядов скорости ветра в районе МГС Ильичевск-порт с учетом годового и суточного хода этих параметров, даёт удовлетворительные результаты. Практически во всех случаях одномодальных распределений, не подчиняющихся гауссовскому закону, для выравнивания рядов скорости приземного ветра можно использовать  $S_L$  и  $S_B$  семейства распределений Джонсона.

### Список литературы

1. Анапольская Л. Е. Ветроэнергетические ресурсы и методы их оценки // Метеорология и гидрология. – 1978. – Вып. 7. – С. 11-17.
2. Антонович В. Д. Особенности временных рядов скорости ветра // Труды ГГО. – 1979. – Вып. 425. – С. 42-46.
3. Ауров В.В., Ивус Г.П., Сельсо Пасос Альберди, Фернандо Мединилья Наполес. Применение распределений Джонсона при выравнивании данных о состоянии атмосферы над западным районом о. Куба // Метеорология, климатология та гідрологія. – 1991. – Вып. 27. – С. 10 – 19.
4. Запелалов А. С., Христофоров Г. Н. Изменчивость поля скорости ветра в прибрежной зоне Черного моря // Метеорология и гидрология. – 1999. – Вып. 4. – С. 77-83.
5. Казаков А. Л. Об использовании различной информации по ветру в прикладных исследованиях // Метеорологія, гідрологія та кліматологія. – 2005. – Вип. 49. – С. 190-203.
6. Кендалл М. Дж., Стюард А. Теория распределений // М.: Наука, 1986. – 588 с.
7. Кондратюк В. И. Об устранении неоднородности в рядах ветра // Труды ГГО. – 1984. – Вып. 485. – С. 130-134.
8. Кобышева Н. В., Наровлянский Г. Я. Климатическая обработка метеорологической информации. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 296 с.
9. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах// М.: Мир, 1969.– 395 с.
10. Школьний Є. П., Лоєва І. Д., Гончарова Л. Д. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації: навч. посібн. [для студ. вищ. навч. закл.]. – Одеса, 1999. – 600 с.

#### **Застосування закону розподілу Джонсона для вирівнювання рядів вітру біля поверхні землі. Агайяр Е.В.**

*Розглянута можливість застосування закону розподілу Джонсона для вирівнювання рядів швидкості вітру біля поверхні землі з урахуванням їх річного і добового ходу в районі морської гідрометеорологічної станції Іллічівськ-порт.*

**Ключові слова:** розподіл Джонсона, ряди швидкості вітру, ексцес, асиметрія.

#### **Application of Johnson's distribution law for alignment series of wind speed at the ground surface. Agayar E.V.**

*It was considered the possibility of applying Johnson's distribution law for equalization series of wind speed at the ground surface with their annual and diurnal variations on the marine hydrometeorological station Illichivsk- port.*

**Key words:** Johnson's distribution law, series wind speed, excess, asymmetry.

УДК 591.5 : 591.044 : 577.42

**Бардан С.И.**, к.б.н.,

*Мурманский морской биологический институт, КНЦ РАН, г. Мурманск (Россия)*

**Сербов Н.Г.**, к. г. н.,

*Одесский государственный экологический университет, г. Одесса (Украина)*

## **ФОРМИРОВАНИЕ БИМОДАЛЬНОГО СЦЕНАРИЯ СУКЦЕССИИ АВТОТРОФНЫХ КОМПОНЕНТ ПЛАНКТОНА В БАРЕНЦЕВОМ И ЧЕРНОМ МОРЯХ И ОЦЕНКА РОЛИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА**

*По результатам моделирования отклика автотрофов на сезонные изменения температуры обсуждается ее роль в формировании сценария циклических сукцессий планктонных сообществ Баренцева и Черного моря. Для анализа используется величина реализации биопродукционного потенциала ( $\mu/\mu_m$ ). Обсуждаются причины формирования и последствия существования фазы "чистой воды" в бимодальном сценарии развития планктона по Богорову–Ширшову.*

**Ключевые слова:** температура, фитокомплексы, сукцессия видов, фаза "чистой воды".

**Введение.** Материальную основу биологической продуктивности водных объектов составляют фотосинтетические процессы, скорость которых определяется комбинацией непрерывно изменяющихся в естественных условиях экологических факторов. Текущее сочетание факторов в различных природных зонах определяет тип трофности и уровень развития первично-продукционных процессов. Согласно волновой схеме сезонных циклических сукцессий комплексов микроводорослей в морских экосистемах, развитие автотрофов и трофически сопряженного с ними зоопланктона, в умеренных и высоких широтах проходит как типичный бимодальный процесс [1, 2].

Для волновой схемы развития компонентов планктона Богорова–Ширшова, ставшей классикой гидробиологии [3,4], важнейшими элементами определяющими последовательность прохождения экологических событий сукцессии автотрофов, являются две стадии их развития. С одной стороны, это зимний гидробиологический сезон, на протяжении которого происходит снижение или полное отсутствие фотосинтетической активности, при резком уменьшении биомассы, вплоть до нулевого уровня. В свою очередь, устойчивое понижение активности фотосинтетических процессов, наблюдаемое в средней части периода активной вегетации – летом, является причиной формирования двух ветвей, делящих его на 2 части. Это прослеживается как сопряженная пара волн "развития", определяющая бимодальное распределение различных показателей функциональной активности микроводорослей (и зоопланктона), при анализе годовых циклов развития любых объектов гидросферы [5,6,7]. Двухмодальные волны такого рода представляют одну из наиболее характерных черт водных экосистем умеренных и высоких широт, С одной стороны, формируется волна соответствующая весеннему максимуму фотосинтеза, с другой – устойчивая активизация развития автотрофных компонент планктона при наступлении осеннего гидробиологического сезона [8]. Тем не менее, для ряда акваторий такое явление наблюдается не каждый год, тогда как для других, наблюдаются существенные отклонения от единого сценария развития. Это привело к длительным дискуссиям о его реалистичности для гидросферы в целом [3,4], хотя отметим, что принципиальных противоречий в самой концепции, за все время дискуссии, выявлено не было.

Авторы этой концепции [1,2] считали, что летнее понижение фотосинтетической

активности и уменьшение суммарной биомассы микроводорослей является следствием мультипликативных взаимодействий. Они возникают как результат несбалансированного развития фитоценозов, перепроизводства первичной продукции и истощения запасов биогенных элементов в фотической зоне – явлениями, ежегодно возникающими в ходе сезонного расслоения водной толщи, а также в процессе ”выедания” микропродуцентов развивающимся зоопланктоном, приводящего к эффекту ”догоняющей” волны. В дальнейшем, ряд исследователей в качестве дополнительной аргументации, связывали феномен резкого снижения активности микропродуцентов в период их активной вегетации с явлениями фотоингибирования, особенностями межбиотических взаимодействий в системе ”микропродуценты–бактерии”, а также множеством других, сопряженных в систему сезонных явлений [1,2,9,10].

В предлагаемой работе, с использованием результатов моделирования, обсуждается влияние сезонной изменчивости температуры среды ( $T$ ) на формирование общего сценария сукцессии автотрофов в период активной вегетации. Объектом моделирования и анализа является величина реализации биопродукционного потенциала ( $\mu_m$ ) – т.е. максимальной потенциальной скорости роста гидробионтов, по модельным кривым ”воздействие–отклик”, на примере автотрофных компонент морского планктона. Модель, включает систему инвариантных функций, описывающих наиболее характерные черты отклика биосистем в любом интервале экологически значимых температур, в диапазонах толерантности комплексов фитоценозов, выделяемых по виду-доминанту [6]. При этом используется безразмерная величина реализации биопродукционного потенциала ( $\mu/\mu_m$ ), зависящая от совокупности стандартных показателей характеризующих диапазон толерантности по  $T$  вида:  $\mu/\mu_m = f(T_{\min}, T_m, T_{\text{opt}}, Q)$ .

В нашей работе, такие изменения биопотенциала мы рассматриваем исключительно как условную – математическую функцию (идеальный объект), что связано с особенностями анализа явления сукцессии под влиянием факторов среды [11,12].

В ходе реализации излагаемой ниже концепции, нами разработаны соответствующие вычислительные алгоритмы и программы, позволяющие проводить вычисление характеристик экологически однородных (”условных”) фитокомплексов  $F_i$ , образующих сукцессионный ряд направленного развития, в любой физико-климатической области гидросферы. Созданные программы позволяют проводить это на персональных компьютерах средней мощности.

**Материал и метод.** 1. *Статическая модель кривых отклика планктонных микроорганизмов на действие T-фактора.* Используя экстремальные принципы воздействия экологических факторов на характеристики экологически однородных фитокомплексов планктонных сообществ и функциональные группы микробиоты, состав функций типа  $\mu = f(T, R_c, S, A)$  и законы теории подобия, методом анализа размерностей [13,14,15], получена функция, позволяющая описывать кривые отклика биосистем в любых интервалах температурной шкалы – диапазонах толерантности. Для нормированной по биопродукционному потенциалу функции отклика (т.е. по максимальной скорости роста микропродуцентов  $\mu_m$ ), реализуемой отдельным фитокомплексом (либо функциональной группой микробиоты или сообществом микроорганизмов, в целом), полученное выражение представляет инвариантную функцию вида:  $(\mu/\mu_m) = f(\Delta T, T_{\min}; T_m; T_{\text{opt}}, T_{\text{кр}}, Q) \equiv f(AT, LT, RT, FT)$ . В сжатой, двухуровневой форме, автомодельное уравнение, выписанное для относительных скоростей роста (каноническая форма, по условию  $0 \leq (\mu/\mu_m) \leq 1$ ), записывается в виде:

$$(\mu/\mu_m) = (1 - LT) RT^{AT} \exp\{AT(1 - RT) + (1 - LT)\}, \quad (1)$$

где:

$$LT = (T_{\text{opt}} - T) / (T_{\text{opt}} - T_{\text{min}}), \quad \text{при } 0 < LT \leq 1, \quad (2)$$

$$RT = (T_m - T) / (T_m - T_{\text{opt}}) \quad \text{при } 0 < RT \leq 1, \quad (3)$$

$$FT = (T_m - T_{\text{opt}}) \ln Q, \quad \text{при } 1 \leq Q, \quad (4)$$

$$AT = \{ [FT^2 (1 + (1 + \pi^2/FT)^{0.618})^2] / T_{\text{кр}} \}, \quad \text{при } 1 < Q, \quad (5)$$

где:

$T_{\text{opt}}$  – экологический оптимум по  $T$ , в °К, при котором, отклик  $\mu$  данного комплекса (группы) достигает максимума, при значении функции  $\mu/\mu_m = f(T_{\text{opt}}) = 1.0$ ;

$T_{\text{min}}$  – минимальная экологическая  $T$ , в °К, соответствует условию, при котором развитие  $\mu_i$  или функционирование полностью прекращаются:  $\mu/\mu_m = f(T_{\text{min}}) = 0$ ;

$T_m$  – максимальная экологическая  $T$ , °К, по достижению которой, скорость роста (интенсивность), пройдя зону оптимума в градиенте  $T$ , снижается до:  $\mu/\mu_m = f(T_m) = 0$ ;

$Q$  – коэффициент формы кривой отклика  $\mu/\mu_m$  (больше 1);

$T_{\text{кр}}$  – температура "тройной точки"  $\text{H}_2\text{O}$ , соответствует равновесному состоянию систем "пар–жидкость–лед", при нормальных условиях  $T_{\text{кр}} = 272^\circ\text{K}$  (или  $0^\circ\text{C}$ ); *exp* – основание натуральных логарифмов.

Как метод вывода модели 1, так и состав аргументов, позволяют отнести ее к классу полуэмпирических [14]. Аргументами, управляющими величиной и формой отклика  $\mu/\mu_m$ , являются стандартные показатели температурной функции роста  $\mu_i = f(T_m, T_{\text{opt}}, T_{\text{min}})$ , характеризующие реальные диапазоны толерантности фитокомплексов по  $T$ . Общий результат количественной оценки по модели 1а, соответствует доле реализации потенциала  $\mu/\mu_{\text{max}}$ , по его зависимости от влияния монодоминирующего  $T$ -фактора [16], действующего по экстремальному принципу [6]. Отметим, что сложность проявлений и множество форм температурной адаптации известных для гидробионтов в настоящее время, привели к тому, что ни одна из существующих моделей, не в состоянии проследить ход промежуточных или скорость-лимитирующих реакций [17,18,19]. Многочисленные попытки описать хотя бы основные процессы температурной адаптации для любого уровня их организации, например, введением специальных параметров [20,21], вряд ли можно отнести к успешным, т.к. большая часть механизмов даже не идентифицирована [5,7,10,22].

Оценка функции отклика фитокомплексов по модели 1 имеет универсальную, инвариантную форму, позволяющую сравнение показателей для разных биосистем или условий. При необходимости расчета конкретной кривой  $\mu/\mu_m$  для комплекса-доминанта включенного в любые фитоценозы, она восстанавливается введением числового масштабного множителя:  $\mu_m = 1, 2, \dots, n$ , т.е. любое вещественное число [4,13]. Применение модели при оценке условий реализации форм кривых  $\mu/\mu_m$ , позволяет получать количественные показатели влияния  $T$  не только для отдельных особей или изолированных популяций (что тривиально), но и для образуемых ими групп – экологически однородных комплексов: фитопланктона и функциональных групп микроорганизмов [6,18].

Такое нетривиальное использование и является целью данной работы. При этом по модели 1 возможна оценка устойчивости экологически однородных фитокомплексов к действию  $T$ -фактора. В настоящей работе это реализуется в рамках более сложной модели, согласно схеме излагаемой далее.

2. *Физико-географическая модель формирования  $T$  деятельного слоя моря.* Изменчивость термодинамических свойств водной среды осуществляемая за счет прямодействия инсоляции  $R_i$ , представляет типичный волновой процесс. Годовой ход изменчивости поверхностных температур ( $T_s$ ) аналитически точно описывается синусоидами, параметры которой функционально связаны с процессами накопления и расхода солнечной энергии  $R_i$ , вида:

$$T_S = A_0 + A_1 \sin(t + \lambda_1) + A_2 \sin(2t + \lambda_2), \quad (6)$$

где:  $A_i, \lambda_i$  – параметры ”солнечных” гармоник;  
 $t$  – линейное время, отсчитанное от заданной точки астрономической шкалы, выраженное в условных градусах – 1 день  $\sim 0.986^\circ$ .

Аналитическое уравнение (6) включает расчет для пары полувольт, сдвинутых по фазам ( $\lambda$ ), соответствующих основным ”солнечным” гармоникам  $A_i$ , с учетом возможности произвольного начала отсчета волны солнечного цикла, для ее привязки к календарным срокам (линейной шкале дат). Значения показателей  $A_i$  и  $\lambda_i$  для разных широт известны и табулированы в соответствии с устойчивостью астрономических факторов, например [19]. Зависимость вида (6), учитывает 85—95% суммарной дисперсии для  $T_S$  (сглаженных подекадно и помесечно), за годовой цикл поступления  $R$ , в подверженную ее прямодействию часть гидросферы. Практически, расчет  $T_S$  для разных широт проводили по уравнению параболического типа 3-го порядка, параметры которого районированы по зонам. В соответствии с географической широтой ( $\varphi$ ), для свободных от льдов акваторий, динамика  $T_S$  описывается уравнением общего вида [4,11,12,19]:

$$T_S = f(\varphi', t) = f(\varphi', R_i, \Sigma R), \quad (7)$$

где:  $\varphi'$  – исправленная географическая широта.  
 $R_i, \Sigma R$  – солнечная энергия, текущая интенсивность поступления и сумма поступившей энергии в данном солнечном году.

Коэффициенты моделей (6–7) скорректированы для возможности использования в условиях свободной от льда акватории Баренцева моря. Результаты, полученные по модели  $T$  для разных широт и полушарий гидросферы, далее используются для расчета оптимизационных параметров морской биоты, входящих в модели 1 в качестве ее аргументов. Это и дает возможность для получения количественной оценки интегрального отклика  $\mu/\mu_m$  на сезонные изменения  $T$  среды.

3. *Моделирование интегральных показателей адаптации биоты к действию  $T$ .* Ограничивающему действию высоких или низких  $T$ , в реальном диапазоне изменчивости подвергаются любые механизмы клеточной регуляции микроводорослей, поэтому регуляторами фотосинтетической активности и скоростей роста микроводорослей могут служить любые, относительно ”медленные” процессы [20,21,22]. Общая форма связи для системы эмпирических уравнений интегрально описывающих некоторые закономерности адаптаций известна, они представляют разные формы экспоненциальных уравнений [19], описывающих изменения оптимизируемой совокупности параметров  $T_{\min}, T_{\text{opt}}$  и  $T_m$  по текущей динамике  $T$  среды [23,24], используемых в качестве аргументов модели 1. Интегральные характеристики адаптации вида  $(T_{\min}, T_{\text{opt}}, T_m) = f(T)$  сообществ автотрофов получали методом моделирования, оптимизируя подбором параметров уравнения связи вида:

$$(T_{\min}, T_{\text{opt}}, T_m) = f(T) = T + A \exp\{-b\}, \quad (8)$$

где:  $A$  и  $b$  – коэффициенты, постоянные в данной широтной зоне (стационарность распределения инсоляции).

При использовании модельных параметров  $(T_{\min}, T_{\text{opt}}, T_m) = f(T)$  в (1) учитывалось, что адаптация к высоким температурам среды, близким к  $T_m$ , по сравнению с приспособлением к экологически оптимальным  $T_{\text{opt}}$ , представляет относительно ”медленный” процесс [19,20]. В силу этого, неизбежно формируются фазовые сдвиги между моментами достижения конечных результатов приспособления

фитокомплекса, что формально учитывалось введением сдвига фаз ( $\gamma$ ) ее разных форм (см. ниже).

Таким образом, согласно особенностям сопряжения структуры частных моделей 1 и 6–9, по объему заложенной информации и применяемой схеме расчетов, отклик в виде  $\mu/\mu_m$  является интегрирующей их свойства функцией. С одной стороны, свойств биоты – компонентов фитоценозов и бактериальных сообществ с биотопом являющимся термодинамической подсистемой, с другой – особенностей влияния основных экологических факторов внешней среды на биогидроценоз, воздействующих по экстремальным принципам ( $R_i$ ,  $\Sigma R$ ,  $T$ )-факторов: солнечной энергии и температуры [11,12]. При этом применение модели формирования кривых отклика  $\mu/\mu_m$  к анализу биосистем, позволяет получать количественную оценку влияния  $T$ , не только для отдельных видов микроорганизмов (что достаточно тривиально), но и для экологически однородных комплексов: фитопланктона или функциональных групп микроорганизмов, в соответствии с динамикой сезонного хода  $\Sigma R, T$ -факторов. Подобное нетривиальное использование модели 1 и является целью предложенной работы.

**Основные результаты.** При верификации и настройке моделей (1–8), привлекали конкретные материалы, полученные как лично авторами в результате мониторингов побережья Баренцева моря (Кольский залив и Дальнезеленецкая губа), а также в открытой части его акватории [11,25,26,27], так и систематические данные, опубликованные в открытых источниках.

Моделирование отклика  $\mu/\mu_m$  проводили для высоких широт ( $69^\circ$  с.ш.), а также для умеренной зоны ( $46^\circ$  с.ш.). Формализация предусматривала два варианта: для полной и неполной адаптации фитокомплексов к сезонной динамике  $T$ . Сценарий варианта полной адаптации предусматривал, что все оптимизационные параметры меняются в соответствии с текущими изменениями  $T$ , т.е.:  $(T_{opt}, T_m) = f(T)$ . Для сценария неполной адаптации автотрофов использовали условие круглогодичной стабилизации показателей  $(T_{opt}, T_m) = const$ . Таким образом, в варианте полной адаптации зона  $T_{opt}$  и величина  $T_m$  непрерывно подстраиваются к изменениям  $T$  по закону наименьших отличий, что соответствует минимизации затрат ресурсов микроводорослей (экстремальный принцип) согласно форме модели 8. В этом варианте, для учета смещения зоны оптимальных  $T_{opt} = f(T)$  и запаздывания реакций относительно модельного хода  $T$ , вводился сдвиг  $\Delta t$  на +5 суток. Для величины верхнего экологического предела  $T_m = f(T)$ , соответствующий фазовый сдвиг  $\Delta t$  относительно хода  $T$ , составлял +10 суток. Модельные кривые отклика  $\mu/\mu_m$  получали подстановкой данных параметров оптимизации ( $T_{opt}$  и  $T_m$ ) из модели 8 в (1).

Результаты моделирования оценки влияния сезонной изменчивости  $T$  на величину  $\mu/\mu_m$  на широте г. Мурманска (Кольский залив–Баренцево море), показаны на рис. 1а,в для двух вариантов расчета.

Для варианта с неполной адаптацией автотрофов (кривая 5), использовали условие круглогодичной стабилизации показателей, отражающих среднесезонную адаптацию к действию температурного фактора, при  $Q_{10} = 1.85$ ,  $T_{opt} = 7.0$  и  $T_m = 11.3^\circ\text{C}$ . В варианте полной адаптации – зона  $T_{opt}$  и положение верхнего предела  $T_m$ , непрерывно подстраиваются к изменениям  $T$ .

Как следует из рис. 1а и 1в, оба варианта моделирования дают сходные результат. При некоторых условиях, в стадии активной вегетации микроводорослей наблюдается угнетение их роста (функциональной активности, в целом). Причиной эффекта является обычная сезонная динамика  $T$ . Различия вариантов для стационарности параметров или при их же оптимизации, заключаются в деталях и выраженности самого эффекта угнетения жизнедеятельности автотрофов. На рис. 1б,г



приведены результаты моделирования действия температурного фактора для 46° с.ш. (Одесский залив–Черное море, 46° с.ш.), дающего близкие результаты, при соответствующем росте среднегодовых  $T$  и увеличении сезонной амплитуды колебаний с 12 до 20 °С.

Отметим, что игнорирование адвективных компонент переноса тепла морскими течениями (или зон подъема холодных глубинных вод), может приводить к существенному отклонению реальных  $T$  от модельного хода этого параметра для акваторий Баренцева или Черного морей. Но, принципиального значения, при решении достаточно идеализированной задачи, такие отклонения не имеют.

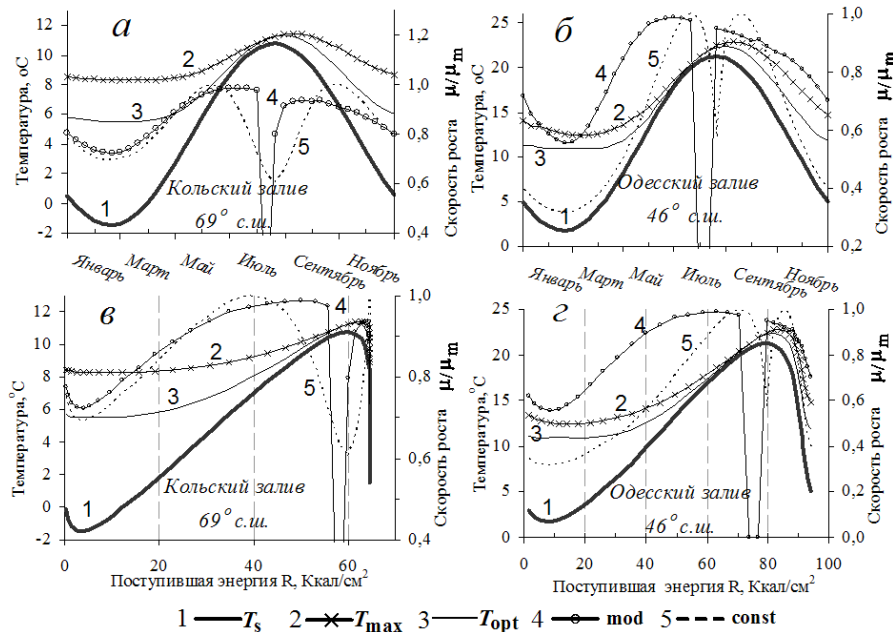


Рис. 1 - Моделирование показателей  $T_{opt}$ ,  $T_m$  и годового цикла  $\mu/\mu_m$  по модели 1–8 для разных широт гидросферы, фазовый сдвиг  $\gamma$  относительно хода среднедекадных  $T_S$  (по 6–8), составляет для  $T_{opt} \approx 5$  сут., для  $T_m \approx 10$  сут.:

а – Кольский залив (69° с.ш.), цифрами показаны кривые динамики (левая шкала): 1 – годовой ход среднедекадных  $T_S$  (по ур. 6–7), 2 – верхний предел  $T_m$ , °С; 3 – зона оптимума  $T_{opt}$ , °С; модельные кривые  $\mu/\mu_m$  (правая шкала): 4 – кривая полной адаптации ( $T_m$ ;  $T_{opt}$ ) =  $f(T)$ , показан разрыв и отдельные ветви кривой; 5 – кривая неполной адаптации (при  $Q = 1.85$ ;  $T_{opt} = 7$  и  $T_m = 11.3$ °С), ось абсцисс – линейное время, месяцы;

б – результаты для широты 46° с.ш. (Черное море–Одесский залив), обозначения как на рис. 1а (кривая 2 неполной адаптации  $Q = 1.85$ ;  $T_{opt} = 20.1$  °С и  $T_m = 21.3$ °С), ось абсцисс – линейное время, месяцы;

в – результаты для Кольского залива (69° с.ш., обозначения рис. 1а) перенормированные на энергетической шкале – ось абсцисс  $\Sigma R$ , ккал/см<sup>2</sup>;

г – результаты моделирования для широты 46° с.ш. (Черное море–Одесский залив, обозначения на рис. 1а), перенормированные на энергетической шкале – ось абсцисс  $\Sigma R$ , ккал/см<sup>2</sup>;

На рис. 1 а, в и рис 1 б, г приведены результаты моделирования показателей  $T_{opt}$  и  $T_m$ , а также годового цикла динамики  $\mu/\mu_m$  для 69° и 46° с.ш., с использованием разных шкал: верхняя – традиционно используемая шкала линейного времени (а, в) и нижняя – в единицах поступившей и накопленной в водной среде солнечной энергии ( $\Sigma R$ ), поступившей с начала года (б, г, ось абсцисс – энергия  $\Sigma R$ , ккал/см<sup>2</sup>). Характер искажения исходной информации получаемой в процессе натурных исследований о

динамике энергозависимых процессов любого рода (т.е. подчиняющихся законам сохранения), вносимых на первом же этапе обработки данных, за счет введения линейной шкалы, совершенно очевиден.

Для проверки и уточнения полученных результатов оценки влияния  $T$  согласно схеме изложенной выше, проведена обработка материалов биомониторинга на акватории  $69^{\circ}11'$  с.ш., за летне-осенний период 16.06–18.09.1989 [10,25,26,27]. Его результаты приведены на рис. 2.

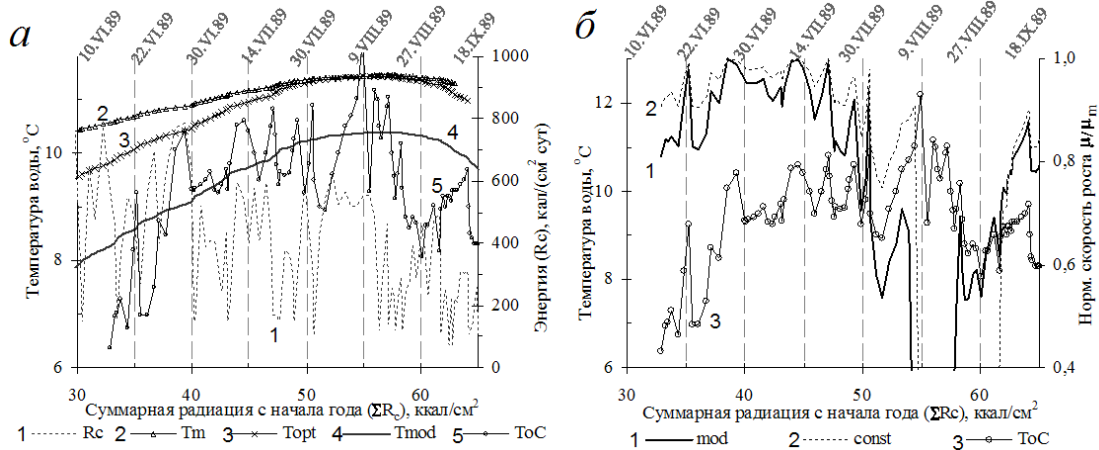


Рис. 2 – Оценка влияния сезонной динамики  $T$  на автотрофные компоненты планктона по модели 1 для акватории  $69^{\circ}11'$  с.ш. (Дальнезеленецкая губа), за период 16.06–18.09.1989. Ось абсцисс – накопленные в экосистеме величины  $\Sigma R_c$  с начала текущего года, ккал/см<sup>2</sup>.

а – (правая шкала): кривая 1 – среднесуточная интенсивность энергии  $R_c$ , по данным Дальнезеленецкой ГМС, ккал/(см<sup>2</sup> сут); (левая шкала): кривая 2 – параметр  $T_m$ , °C; 3 – параметр  $T_{opt}$ , °C; кривая 4 – динамика  $T$  (по модели 6–7), °C; кривая 5 – измеренные  $T$  осредненные по слою 0–2 м, °C;

б – (правая шкала): кривая 1 – отклика  $\mu/\mu_m$  при варианте полной адаптации модель (6–7), при  $Q_{10} = 1.85$ ; кривая 2 (*const*) – то же для варианта неполной адаптации, при  $T_m = 11.4$  °C и  $T_{opt} = 9.0$  °C, при  $Q_{10} = 1.85$ ; (левая шкала): кривая 3 – измеренные  $T$  по слою 0–2 м, °C.

На рис. 2а, кривая 5 соответствует прямым измерениям  $T$  осредненным по слою 0–2 м в Дальнезеленецкой губе, а жирной сплошной линией (кривая 4), показаны результаты расчетов  $T$  по модели 6–7. Анализ изменений  $T$  показывает, что в исследуемый период модельные данные соответствуют сглаженному по пентадам (или декадам) ходу реальных  $T$  в этой части акватории Баренцева моря, с учетом более 70% дисперсии  $T$ . Сплошной линией с маркерами (кривая 3), показаны смещения зоны экологического оптимума развития автотрофов:  $T_{opt} = f(T)$ , по модели 8 при фазовом сдвиге  $\Delta t$  относительно модельных  $T$  на +5 суток. Кривая 2 соответствует расчетным значениям верхнего экологического предела развития комплексов фитоценоза:  $T_m = f(T)$ , при фазовом сдвиге (для учета замедления)  $\Delta t$  относительно модельных  $T$  на +10 суток. Причем, значения оптимизационных параметров  $T_{opt}$  и  $T_m$  получали по модельным  $T$  (рис. 2а, кривая 4), а при расчете функции отклика  $\mu/\mu_m$  по модели 1, использовали измеренные  $T$  в губе. Как следует из реального хода  $T$ , ее превышение в губе относительно значений обоих параметров оптимизации, наблюдали 1 раз, что указывает на выполнение условий моделирования. На рис. 2б приводятся модельные кривые (правая шкала) отклика  $\mu/\mu_m$  по (1).

Результаты моделирования  $\mu/\mu_m$  по сценарию с полной адаптацией (при  $Q = 1.85$ , см. выше), показаны сплошной линией, пунктиром кривая 2 (*const*) для сценария неполной адаптации (для постоянных  $T_m = 11.4$  °C и  $T_{opt} = 9.0$  °C, при  $Q_{10} = 1.85$ ).

Кривая 3 с маркерами (по левой шкале) соответствует измеренным  $T$  для слоя 0–2 м.

На рис. 2 а,б, для возможности корректного сопоставления с данными на других акваторий или широтных зон, а также с другими типами водных систем, все построения проведены с использованием энергетической шкалы – ось абсцисс  $\Sigma R$ , по методу изложенному в [11,26]. На энергетической шкале отложены накопленные величины солнечной энергии  $\Sigma R$  поступившей к поверхности воды с начала текущего солнечного года, [ккал/см<sup>2</sup>]. В верхней части рис. 2 а,б на вспомогательных осях, для ориентирования приведены даты характерных значений  $\Sigma R$ . Такое построение демонстрирует тип и характер необратимости искажений любых исходных данных, только за счет традиционного использования шкалы "линейного" времени (см. выше и рис. 1).

На рис. 3 приведены результаты анализа сезонной изменчивости автотрофных компонент планктона прибрежной акватории Баренцева моря (Дальнезеленецкая губа, 69°11' с.ш.), интегрально характеризующие динамику некоторых показателей функциональной интенсивности в процессах биосинтеза микропродуцентов.

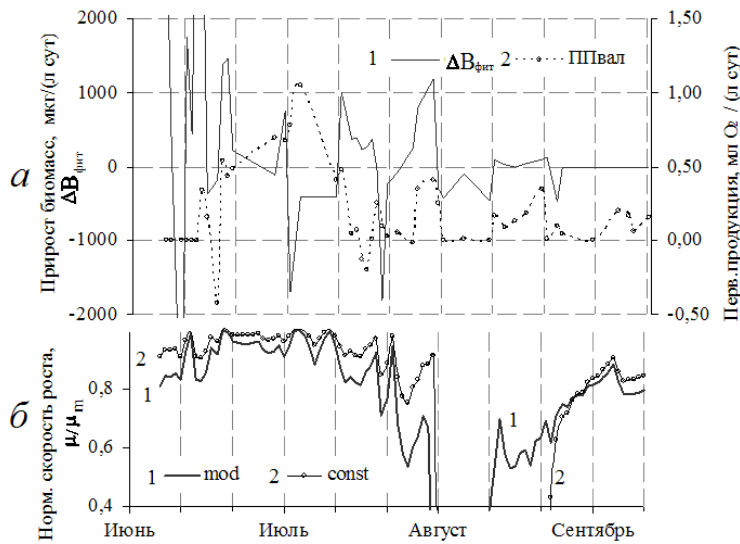


Рис. 3 - Оценка влияния изменчивости  $T$  на функциональные показатели развития автотрофных компонент планктона по модели 1–8 для акватории 69°11' с.ш. (Дальнезеленецкая губа), по материалам биомониторинга за 16.06–18.09. 1989 г. Ось абсцисс – линейное время:

а – (левая шкала): кривая 1 – суммарный прирост абсолютных биомасс всех групп автотрофов ( $\Delta B_{\text{фит}}$ ), по данным экспериментов *in situ* (светлые склянки), мкг/(л сут); (правая шкала): кривая 2 – валовая первичная продукция по кислородному методу ( $\text{ПП}_{\text{вал}}$ ), мг  $\text{O}_2$ /(л сут);

б – (правая шкала): кривая 1 – модель отклика  $\mu/\mu_m$  при полной адаптации; кривая 2 – модель неполной адаптации (рис. 2).

На рис. 4 приводятся результаты анализа качественного состава и сезонных изменений показателей обилия автотрофных сообществ по Дальнезеленецкой губе. На рис. 3 и 4 приводятся оригинальные данные по биомониторингу за 16.06–18.09.1989, частично изложенные в работах [11,12,25,26,27].

**Обсуждение результатов. Модельный эффект подавления жизнедеятельности автотрофов.** По результатам моделирования функции  $\mu/\mu_m$  на моделях 1–8, получено ее закономерное широтное распределение, при практически одномоментном проявлении ряда эффектов, включая угнетения автотрофных

компонент в разных климатических зонах (рис.1). При этом анализ сезонных изменений для экспериментально измеренных показателей функциональной активности и скоростей роста комплексов автотрофов в Баренцевом море (рис. 3), показывает на соответствие результатов моделирования, целому ряду процессов, реально наблюдаемых в водных массах Баренцева моря в период активной вегетации (рис. 2). В свою очередь, формирование таких эффектов определяется, как направленностью или устойчивостью движения потоков гидросферы, так и их постоянным взаимодействием с сезонными изменениями  $\Sigma R, T$ -факторов в этом слое. Особо выделим невозможность корректного разделения последствий воздействия этой пары факторов [4,9,16,27], совокупность изменений которых, представляет единый, динамический процесс, сопряженный с циклом поступления свободной энергии  $R$ , параметры которого регулируются внешними (астрономическими) факторами. Но, по этим же причинам, закономерности широтного распределения отклика  $\mu/\mu_m$ , при правильном формулировании исходных положений, всегда должны соответствовать как зональному распределению свойств водных масс, так и закономерностям инсоляции к поверхности гидросферы [4,10,19].

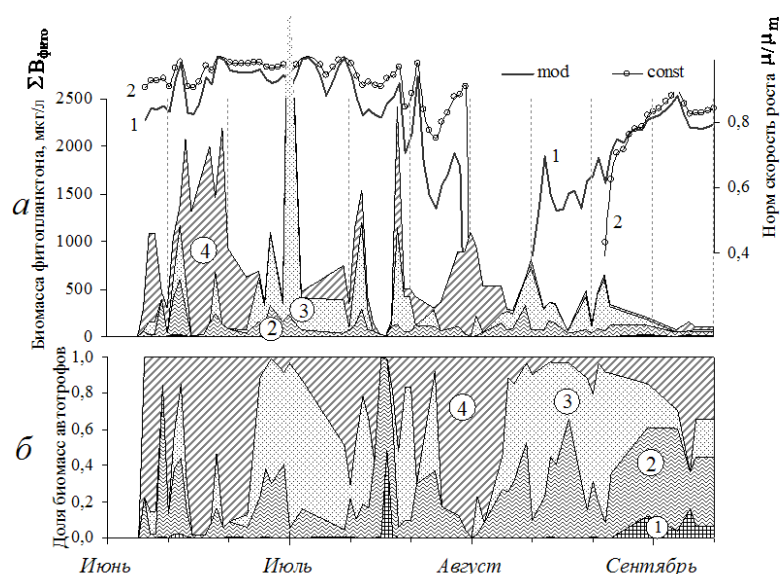


Рис. 4 - Сезонная изменчивость показателей развития автотрофных компонент планктона в прибрежье Баренцева моря (Дальнезеленецкая губа), по материалам биомониторинга за 16.06–18.09. 1989 г. Ось абсцисс – линейное время:

а – кривая 1 (правая шкала) – модель отклика  $\mu/\mu_m$  с полной адаптацией:  $T_{орт}, T_m = f(T)$ ; кривая 2 – модель с неполной адаптацией (см. подписи рис. 2); левая шкала – кривые динамики абсолютных биомасс (мкг/л) основных размерных и систематических групп автотрофных компонент, штриховкой выделены 1 – пикопланктон ( $B_{pk}$ , при  $d_{cp} \leq 2$  мкм); 2 – автотрофный нанопланктон ( $\Sigma B_{np}$ , при  $2 \leq d_{cp} \leq 20$  мкм); 3 – биомасса автотрофных динофлагеллят ( $B_{Df}$ ); 4 – биомасса диатомовых ( $B_{Dt}$ );

б – динамика структуры сообществ автотрофов, в долях от общей биомассы всех групп ( $\Sigma B_{фит}$ ), цифрами показаны изменения соответствующих групп микроводорослей (см. подписи 4а).

Согласно сравнительному анализу модельных и экспериментальных данных, показанных на рис. 1–3, следует, что в ходе обычной сезонной динамики  $T$ , в зоне фотосинтеза наблюдаются эффекты угнетения автотрофов, выраженные на протяжении исследуемого периода (июнь–сентябрь). Промежутки с существенным проявлением эффектов подавления развития автотрофов, со снижением функции  $\mu/\mu_m$  до  $\sim 85$ – $90\%$

от максимума, как по модельным результатам, так и исходя из инструментально измеренных показателей: обилие (биомасса, численность), структура и функциональная активность (первичная продукция или скорости прироста биомасс), показанных на рис. 3а, охватывают практически весь этот период.

Достаточно серьезное угнетение, достигающее  $\sim 20\%$  от  $\mu/\mu_m$  и более, по модельным данным (рис. 2 и 3б), отмечено и в период наиболее интенсивного развития микропродуцентов. Это прослеживается для начальной фазы летнего гидрологического сезона, наступающей при величинах поступления солнечной энергии  $\Sigma R_c = 25\text{--}30$  ккал/см<sup>2</sup> [11,26,27]. В этой фазе развития фитокомплексов наступление эффектов их угнетения (по 1–8) связано с формированием 2-х ветвей с максимально быстрым ростом  $T$  в поверхностном слое: в диапазонах  $T \approx 6\text{--}9$  и  $7\text{--}10^\circ\text{C}$  (см. рис. 2), связанных с скоростью поступления энергии  $R$  в среду (рис. 2а). Полное исчезновение эффекта угнетения автотрофов по отклику  $\mu/\mu_m$ , для коиматических (свето-температурных) условий на широте Дальнезеленецкой губы, происходит уже в осенний период, во 2-й декаде сентября, при  $T \sim 8.5\text{--}9.0^\circ\text{C}$  и  $\Sigma R_c = 55\text{--}60$  ккал/см<sup>2</sup>.

Фазовые сдвиги между оптимизационными параметрами  $T_m$ ,  $T_{opt}$  и, вероятно  $Q$ , интегрально характеризующих разные формы температурной адаптации автотрофов к трендами  $T$  в ходе сезонной динамики теплосодержания ВДС, а также их же, но, относительно динамики уровня текущей инсоляции  $R$ , приводит к устойчивому, ежегодному проявлению максимального угнетения деятельности автотрофов в средней части вегетационного периода – в конце июля– начале 1-й декады августа. В этот период величины функции  $\mu/\mu_m$  достигают минимума  $\sim 0\text{--}20\%$ , т.е. полное подавление активности и роста (см. рис. 2 и 3). По результатам моделирования функции  $\mu/\mu_m$  в вариантах с полной адаптацией, развитие реакции приводящей к угнетению автотрофов, во времени, имеет резко нелинейный характер (рис. 2 и 3б). Реакция фитокомплексов нарастает лавинообразно, по достижению разности оптимизационных  $\Delta T = (T_m - T_{opt}) \approx 0.5\text{--}1^\circ\text{C}$  (см. кривые 1 и 2 на рис. 2б и 3б). Это явление устойчиво приурочено к моменту приближения  $T$  в фотической зоне к области максимальных значений  $T \approx 10\text{--}11^\circ\text{C}$ , характерных в данной широтно-климатической зоне Баренцева моря. Причем, модельные данные вполне корректно отражают изменения интенсивности функциональных процессов, измеренных инструментально в водной среде (рис. 3а).

Согласно результату моделирования, необходимыми и достаточными условиями для формирования эффекта "подавления" роста или резкого снижения функциональной активности автотрофов являются два условия. Во-первых, общая амплитуда размаха колебаний  $\Delta T$  и текущая скорость изменений температуры ( $dT/dt$ ) в среде (рис. 1 и 2). Во-вторых, множественность форм температурных адаптаций биоты, которую, можно разделить на "быстрые" и "медленные", в нашем случае –  $T_{opt}$  и  $T_m$ , соответственно (см. выше), определяющими фазовые сдвиги и возникновение нелинейных эффектов взаимодействий с  $T$  среды. Третьим, в определенной мере, сопутствующим процессом, задающим дальнейший ход протекания температурной адаптации  $\mu = f(\Delta T, T_{min}, T_m; T_{opt}, Q)$ , является смена направленности температурной акклимации. Это происходит при изменении тренда  $\Delta T$  с переходом к осеннему гидрологическому сезону при смене градиента  $T$ -фактора во времени, с "плюс" на "минус", что соответствует и наступлению сезона гидробиологической осени.

При этом моделирование влияния коэффициента формы  $Q$ , биологическое содержание которого, в определенной мере соответствует стандартному показателю температурного ускорения  $Q_{10}$ , во всех вариантах, показывает на практическое отсутствие влияния, на значение функции  $\mu/\mu_m$  для области максимального угнетения показателей жизнедеятельности (при  $\mu/\mu_m = 0$ ). Например, вариации коэффициента  $Q$

приводят только к изменению выраженности эффекта или ширины зоны с подавлением активности сообществ микроводорослей во времени. Такой результат, вполне вероятно, связан с характером проявления реакций отклика биоты на воздействие, которое осуществляется на одном уровне, организмов или популяций, тогда как эффект проявляется на уровне однородных экологических комплексов и отдельных компонент сообществ (фитоценозах и функциональных группах). Мы считаем, что с одной стороны, это нетривиальный результат, с другой – он же вполне ожидался, учитывая современный уровень знаний о характере адаптаций автотрофов к низким или высоким температурам [22,23,25,28,29,30 и др.].

**Характеристика развития фитоценозов Баренцева моря.** Исходя из сезонной изменчивости экспериментально измеренных показателей функциональной активности и скорости роста комплексов автотрофов для побережья Баренцева моря (рис. 3а), на основании статистического анализа сделан ряд заключений, наиболее важными из которых являются следующие.

1. Явное формирование эффектов угнетения функциональной активности автотрофных компонент планктона, отражающихся на изменчивости показателей обилия и скоростях прироста биомасс. При этом инструментально измеренные характеристики сопряжены с динамикой модельной функции реализации потенциала  $\mu/\mu_m$ , управляемой изменениями  $T$  и характеристик  $\Sigma R_c$  (рис. 2а и 3 а,б).

2. Наличие "солнечных" гармоник 1-го или 2-го порядка в изменчивости скоростей прироста и закономерностях колебаний для интенсивности первично-продукционных показателей (см. 6 и 7). При этом сама цикличность функциональных показателей связанная с уровня  $R$ , опосредуются через сезонную динамику теплосодержания  $T$  (рис. 2 и 3а).

3. Практическое отсутствие прямых связей между текущей интенсивностью потока  $R_c$  и функциональной активностью автотрофных компонент. Это указывает, с одной стороны, на полное "световое" насыщение характерное для этого периода, с другой – на экологическое опосредование влияния солнечной энергии через теплосодержание –  $T$  в фотической зоне (рис. 2а и 3).

4. "Инситный" характер формирования изменчивости как показателей функциональной активности фитоценоза в целом, так для отдельных учетных групп микроводорослей, включая пико- и наннопланктон, диатомовых и перидиниевые микроводоросли [11,26,27]. Это указывает на минимизацию воздействия "прочих" внешних факторов, включая в этот перечень гипотетическое влияние "выеданий" разным зоопланктоном (микро-, "мирным" или "хищным") [2,3,4], а также минимизацию влияния адвективных компонент переноса вод в изменчивость показателей развития автотрофов. Отметим, что адвекция может быть связанной с горизонтальным переносом биоты в составе масс вещества. Отсюда следует полное соответствие экстремальному принципу регулирования, характерному для действия  $L$ -факторов на биоту [6,16,17].

5. Закономерное распределение наиболее характерных черт динамики, как для инструментально измеренных показателей функциональной активности, так и для условного модельного отклика  $\mu/\mu_m$ , на энергетических шкалах  $\Sigma R$ , но, не по временной – линейной шкале ("по часам"), что следует из рис. 1а,в.

6. Момент устойчивого перехода фитоцена в фазу развития с устойчивым подавлением процессов функциональной активности и роста биомасс автотрофов на 20% и более от максимума, наступает при величинах поступления солнечной энергии в биотоп на уровне  $\Sigma R$  около 45 ккал/см<sup>2</sup>. При этом календарные сроки такого накопления энергии в воде весьма устойчивы и приходится на середину июля (рис. 1а,в и 2).



7. Максимальное проявление эффекта "подавления" для прибрежной зоны Баренцева моря (до 100%), по модельным и экспериментальным данным приходится на момент непосредственного перехода от летнего к осеннему гидрологическому сезону (в конце 1-й декады августа), при величинах  $\Sigma R \approx 50$  ккал/см<sup>2</sup> (см. рис. 1в)

8. Период с максимальным проявлением эффекта "подавления" продолжается примерно декаду, а постепенная релаксация сообществ автотрофов, со снижением эффекта до 80% от максимального уровня функции  $\mu/\mu_m$ , наступает, как правило, только к середине сентября, к моменту окончания осеннего гидробиологического сезона. При этом в данной широтной зоне, в данный момент заканчивается период активной вегетации микроводорослей, что происходит по поступлению в водную среду  $\Sigma R \approx 62-65$  ккал/см<sup>2</sup> (см. рис. 1в и 2б).

9. Развитие экологически однородных фитокомплексов выделение, которых производится по монодоминирующему виду [6,7,17], как показано в ряде предшествующих работ [11,12], для каждой широтной зоны является детерминированным. Для южного берега Баренцева моря, во-первых, температурными условиями в биотопе, ограничивающими развитие каждого их фитокомплексов рамками экологического диапазона для температуры:  $\Delta T_{эк} \approx 2.5-3^\circ\text{C}$ . Во-вторых, характерным для автотрофов квантованием их развития как энергозависимого процесса, величиной энергии  $\Sigma R$ , оцениваемой  $\Sigma R_{эк} \approx 8-12$  ккал/см<sup>2</sup>, поступающей в среду на протяжении периода их развития [11,12,26,27].

10. Всего в исследуемой широтно-климатической зоне Баренцева моря, на протяжении каждого из годовых циклов поступления солнечной энергии, численно равном  $\Sigma R \approx 63-68$  ккал/см<sup>2</sup>, с характерной амплитудой размаха  $\Delta T$  около:  $(-1.8-12^\circ\text{C}) \approx \Delta T \approx 14^\circ\text{C}$ , происходит последовательное развитие 5-6 экологически однородных фитокомплексов (2-3 – весенних, 3 – летних, иногда 1 – осеннего) [11,12].

11. В отношении динамики структуры фитокомплексов, наблюдаемой в модельный период (рис. 4), получены выводы, наиболее важными являются:

- явное отсутствие устойчивых количественных соотношения разных групп сообществ автотрофов в пределах любого из смежных сезонов, при одновременном существовании длиннопериодных трендов по градиенту  $T, \Sigma R$ -факторов: весна-лето-осень, например, снижение доли крупных форм микроводорослей, при увеличении вклада автотрофного пико- и нанопланктона;

- необратимость структурных перестроек и изменений состава сообществ, наблюдаемых на протяжении каждого из смежных гидробиологических сезонов;

- высокая степень подобия в последовательностях перестроек структуры автотрофов всех гидробиологических сезонов при наличии активной вегетации, определяющей для доминирующих по биомассе форм образование рядов: диатомовые => перидиниевые => нанопланктонные => пикопланктонные размерные фракции;

- одновременная реализация по градиенту  $T, \Sigma R$ -факторов общей тенденции снижения как показателей обилия, так и функциональной активности ( $\text{ПП}_{\text{вал}}$  и прирост биомасс  $\Delta N_{\text{фито}}$ ) по градиенту  $\Sigma R$  (рис. 2-4).

12. Видовой состав микроводорослей, развивающихся на акватории Баренцева моря в водах атлантического или арктического генезиса, обладает высоким сходством [1,2,8], при существенных различиях  $T, \Sigma R$ -факторов [25]. В первую очередь, это относится к видам микропродуцентов, устойчиво образующих пики "цветений" – доминирующих форм. Исходя из результатов многолетних наблюдений выделим такой ряд доминирующих видов: *Fragillaria oceanica*, *F. cylindrus*, *Navicula granii*, *Thalassiosira nordenskioeldii*, *T. decipiens*, *T. gravida*, *T. hyalina*, *Porosira glacialis*, *Chaetoceros socialis*, *C. debilis*, *C. subsecundus*, *C. furcellatus*, *Phaeocystis pouchetii*, *Thalassionema nitzschioides*, *Skeletonema costatum*, *Gymnodinium wulffii*, *G. arcticum*,

*Peridinium mitmscuhim* [1,2,3,4,25]. Приведенный порядок видов упорядочен по ходу формирования ними максимальных биомасс, т.е. представляет "стандартный" сукцессионный ряд исследуемой части акватории Баренцева моря [11,12]. Исходя из основных таксонов упорядоченных по мере их массового появления в составе микрофитопланктона ясно, что основу весеннего сообщества составляют диатомеи, а летнего – перидиниевые микроводоросли.

Исходя из сравнительного анализа экспериментальных данных и модельных результатов (по 1–8), уровень подавления активности микроводорослей сезонным ходом  $T$ , при изменениях величины математической функции отражающей реализацию потенциала  $\mu_m$ , до уровня:  $\mu/\mu_m \leq 0.80-0.85$ , следует принять в качестве критического критерия. Дело в том, что близкие к таким значения функции  $\mu/\mu_m$ , соответствуют началу периодов с быстрой перестройкой структуры фитокомплексов планктона (п. 6–11, выше). Каждый из фитокомплексов имеет вполне определенное сочетание биомассы разных групп микроводорослей, представляя отдельную стадию направленного развития фитоценоза в целом, являющуюся "счетной единицей" (целочисленной) сукцессии.

**Анализ формирования эффектов угнетения и фаза "чистой воды".** Эффект угнетения биоты полученный на модельных результатах, имеет свой вполне реалистический аналог в природе, известный для водных систем как фаза "чистой воды" [5,11,31]. В реальных условиях, например, для Баренцева или Карского морей, наступлению этой фазы периода активной вегетации развития фитоценоза, обычно предшествует активизация деятельности жгутиковых микроводорослей, относящихся к нано- и пикоразмерным фракциям [26,27,32]. С наступлением стадии "чистой воды", лучше всего наблюдаемой после такого сильного "цветения" микроводорослей, происходит резкое "просветление" водной среды, когда ее прозрачность скачкообразно увеличивается в несколько раз [5,26,31]. В этой фазе биомасса автотрофов в деятельном слое снижается до минимальных, за весь период активной вегетации величин, а функциональная активность близка к нулю [10,11,26,27]. При этом фаза "чистой воды" – есть тот феномен, который по существу, практически разрывает на две неравные части волну развития автотрофов в период их вегетации. Причем, само явление полностью соответствует динамике накопления солнечной энергии в системе и характеру изменений  $T$  в ВДС, получаемых по моделям (см. рис. 1в,г). Таким образом, двухмодальный сценарий волнового развития планктона Богорова–Ширшова, в целом, соответствует результатам моделирования функции отклика  $\mu/\mu_m$  по модели (1 и 6–8) и характеру биологического развития в естественных условиях, при реализации этой особой фазы, что и показано на рис. 1–3.

Феномен "чистой воды" и явления связанные с его наступлением, известны достаточно давно. Но, традиционно причины его наступления связываются либо с трофическими взаимодействиями в системах "фито–зоопланктон", либо с другими экологическими факторами. Подобные эффекты ежегодного и резкого наступления фаз "чистой воды", устойчиво наблюдаются как в пресноводных, так и в морских экосистемах, примерно в середине летних гидробиологических сезонов, что детально анализируется в ряде наших работ [11,12,26]. Причем, в некоторых случаях, состояния соответствующего этой стадии развития фитоценозов, достигают даже их арктические разновидности. Со всей очевидностью это было показано в материалах приводимых в работах П.П. Ширшова и В.Г. Богорова по Русской Арктике [2,8], но, в силу отсутствия такого понятия в то время, ее идентифицировали несколько по другому.

Тем не менее, как причины формирования таких эффектов, так и его последствия [5], вплоть до настоящего времени, очень слабо изучены, предоставляя обширное поле для множества отвлеченных от реальности фантазий. Например, в



работе [31], при исследовании причин формирования фазы "чистой воды" для пресноводных объектов, отмечали резкое увеличение прозрачности с 1—2 и до 10 м глубин, считая само это явление, зависящим от мультипликативных эффектов. В их состав включалось взаимодействие климатических и физико-химических условий с прессом зоопланктона (популяциями дафниями), которые быстро "выедали" биомассу микропродуцентов. Отметим, что достаточно быстро, дафнии прекращали это воздействие на фитоценоз. С другой стороны, мультипликативными формами взаимодействий, особенно, со стороны неопределенного множества  $L$ -факторов, достаточно просто объяснять все что угодно, но понятно, что это тривиальный способ отсутствия осознанных попыток, хотя бы указать на реальную причину явлений.

**Взаимодействие  $\Sigma R, T$ -факторов как пример экологических опосредований и причина введения естественных масштабов для энергозависимых процессов.** На рис. 2а показана связь интенсивности текущего потока  $R$  (кривая 1) с реальным ходом  $T$  в слое 0—2 м (кривая 5). Анализ показывает, что в ветви прогрева в летний сезон, практически весь прирост теплосодержания ВДС – наиболее активной гидродинамически области Баренцева моря (подверженной мощному отепляющему влиянию северо-атлантических течений), определяется изменениями притока  $R$ . При этом учитывается более 80–90% в общей дисперсии среднепентадных и среднедекадных  $T$  исследуемой акватории. Согласно подобной устойчивости связи  $T = f(R)$ , вклад адвективных составляющих (например, теплосодержания североатлантических течений) в текущие значения  $T$  в период активной вегетации и в соответствующие гидрологические сезоны – минимален (в отличие от зимнего). Функциональная зависимость  $T = f(R)$  с одной стороны, показывает на генезис сезонной изменчивости  $T$ , с другой – на наличие четкой иерархии в последовательности действия для главных экологических  $\Sigma R, T$ -факторов. Наиболее явно это можно проследить на примере экологического опосредования влияния  $R$  на фитокомплексы.

Так, исходя из генезиса этой связи  $T = f(R)$ , инструментальных данных по функциональной активности автотрофов и результатов моделирования функции  $\mu/\mu_m$ , "солнечные" гармоники, присутствующие в изменчивости отклика автотрофных компонент, формально – возникают исключительно под действием температурного фактора. При подобном типе опосредования воздействия  $R$ -фактора на фитоценозы через изменения  $T$  среды, только влияние  $T$ -фактора является необходимым и достаточным условием для сопряжении  $R$ -фактора с динамикой  $\mu/\mu_m$ . При этом самостоятельное влияние со стороны реально ведущего  $R$ -фактора, трансформируется уже в необходимое, но недостаточное условие, для возникновения солнечных гармоник в функциональной активности автотрофов, что следует из принципа действия монодоминирующих  $L$ -факторов [11,12,16,17]. Такие изменения характера воздействий  $R$ -фактора определяется трансформацией его влияния по экстремальному принципу, в последовательности: трофический-повреждающий-летальный-сигнальный, согласно полному световому "насыщению" реакций фотосинтеза в самом начале периода вегетации фитоценозов [2,10,19,20]. Следовательно, даже исходя из структуры модели 1, изменение скоростей роста и функциональной активности автотрофных компонент планктона, прямо не будет зависеть от интенсивности потока энергии  $R$  (как необходимого условия), а опосредуется через вклад в теплосодержание (необходимого и достаточного), как это сделано в модели 1–8. Согласно применяемой в модели схеме последовательных расчетов, прямое влияние  $R$  на свойства системы происходит только в процессе формирования теплосодержания ВДС, задаваемого по  $T$  (ур. 6–7). В свою очередь, показатель  $T$  трансформируется в рамках модели 8 действуя далее через параметры оптимизации ( $T_m$ ,  $T_{opt}$  и  $Q$ , по ур. 8), при формировании отклика  $\mu/\mu_m$ . Это же заключение следует и из особенностей развития процессов, регулируемых

экологически опосредованными  $L$ -факторами [15,16,19].

Таким образом, следуя приведенным выше соображениям, каждый из годовых циклов развития фитоценозов водных систем, по особенностям действия ведущих  $L$ -факторов, на основе экстремальных принципов четко делится на две характерных области. Во-первых, зона с отсутствием активной вегетации фитокомплексов, а соответственно и полного отсутствия энергозависимых процессов фотосинтеза (и первичной продукции как таковой), совершенно очевидно является областью монодоминирующего влияния солнечной энергии –  $R$ -фактора. Во-вторых, исходя из того же экстремального принципа, другую зону, формально, занимает область монодоминирующего влияния  $T$ -фактора. Вместе с этим отметим, что все же объективно существует практическая невозможность корректного разделения последствий воздействий этой пары "лимитирующих" экологических  $R, T$ -факторов [4,5,9,11], по крайней мере, в период активной вегетации, что следует помнить.

На рис. 5 приведены области такого отдельного, монодоминирующего действия  $R, T$ -факторов для исследуемых акваторий Баренцева и Черного морей.

Автомодельный тип применяемых в расчетах уравнений делает сходство энергозависимых процессов биосинтеза и изменения свойств водной среды для этих, совершенно отличающихся физико-климатических областей, достаточно очевидным. Учитывая смысловое содержание процессов в фазовых плоскостях задаваемых параметрами такого рода, понятны и причины подобия [11,12].

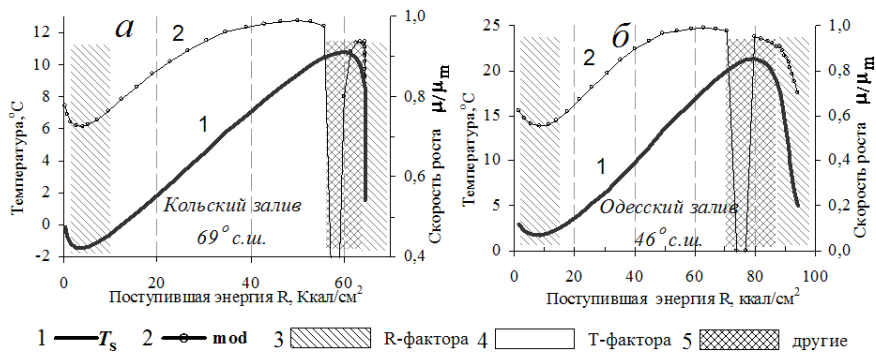


Рис. 5 - Выделение областей монодоминирующего действия  $T, R$ -факторов по энергетическим шкалам, в фазовой плоскости  $T-R$  параметров для широтно-климатических зон Баренцева и Черного морей – ось абсцисс  $\Sigma R$ , ккал/см<sup>2</sup>. Цифрами показаны: (левые шкалы), 1– ход среднедекадных  $T_s$  (по 6–7); (правые шкалы) 2 – модельный отклик  $\mu/\mu_m$  (по модели 1), по сценарию полной адаптации; 3 – зона монодействия  $R$ -фактора; 4 – зона монодействия  $T$ -фактора; 5 – зона мультипликативных взаимодействий  $R, T$ -факторов с другими.

а – Кольский залив (69° с.ш.); б – Черное море–Одесский залив (46° с.ш.).

Кратко охарактеризуем зоны преобладающего действия  $T, \Sigma R$ -факторов, показанные на рис. 5 а,б. Согласно результатам моделирования по 6–7, календарный период монодействия  $R$ -фактора, на 69° с.ш., для случая свободной от льдов поверхности, составляет до 180 суток (октябрь–март), а на широте Одесского залива (46° с.ш. около 110–120 суток (ноябрь–февраль). При этом область монодоминирования воздействия  $T$ -фактора на фитокомплексы, для 69° с.ш. охватывает период около 180 суток, на протяжении которого в водную среду поступает и аккумулируется  $\Sigma R \approx 40\text{--}45$  ккал/см<sup>2</sup>, при амплитуде  $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$ . Для 46° с.ш., за соответствующий период активной вегетации, при доминирующем действии  $T$ -фактора, оцениваемого в 250 суток,

поступает и аккумулируется около  $\Sigma R \approx 70\text{--}75$  ккал/см<sup>2</sup>, что обеспечивает размах годовой амплитуды  $\Delta T \approx 19\text{--}20^\circ\text{C}$ .

Зоны с максимальным подавлением активности микропродуцентов, а также часть прилегающей к ней начальной стадии осеннего гидробиологического сезона, представляют области мультипликативных взаимодействий:  $R, T$ -факторов, свойств водной среды и совокупности других форм воздействий  $L$ -факторов (см. выше). Эту хаотизированную часть фазовой плоскости, занимающую период не более 1–2 декад, мы выделяем отдельно (см. рис. 5). С одной стороны, это определяется ее значимостью при формировании особенностей волнового развития для планктона, с другой – неопределенностью содержания явлений, при наступлении этого феномена.

**Количественная оценка условий и ресурсы развития фитокомплексов.** Приведенные результаты применения географической модели формирования отклика  $\mu/\mu_m$  в разных широтно-климатических зонах, дают возможность уточнить свойства экологически однородных групп автотрофов ( $F_i$ ), участвующих в процессах сукцессии в водных объектах. В частности, получить количественную оценку условий и ресурсы имеющиеся для развития фитокомплексов. Это возможно используя проанализированные выше свойства энергезависимых процессов, протекающих в соответствующих координатах  $T, \Sigma R$ -параметров фазовых плоскостей, устанавливающих закономерности для скорости и последовательности их развития на этих шкалах. На рис. 6 приведены результаты моделирования стандартных характеристик экологических диапазонов толерантности для 7-ми однородных фитокомплексов  $F1b\text{--}F7b$  по модели 1 на широте Одесского залива ( $46^\circ\text{с.ш.}$ ).

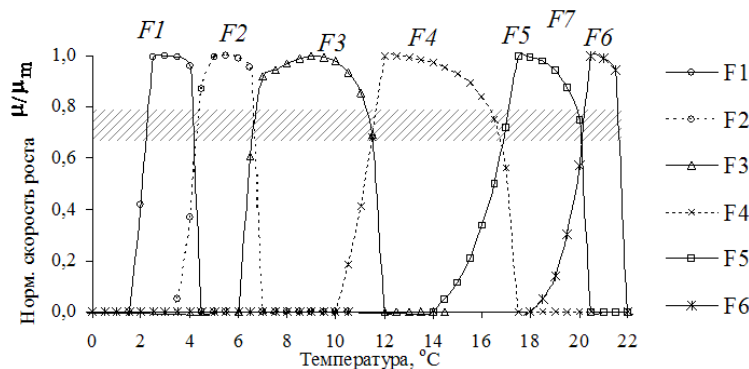


Рис. 6 - Результаты моделирования экологических диапазонов толерантности ( $T_{эк}$ ) для однородных комплексов микропродуцентов  $F1b\text{--}F7b$  в бореальной биогеографической зоне, с учетом ее ресурсов ( $\Sigma R \approx 50\text{--}60$  ккал/см<sup>2</sup>, при  $\Delta T \approx 15^\circ\text{C}$ ).

Согласно результатам моделирования по 6–7, развитие фитокомплексов обеспечивается ресурсами данной широтной зоны бореальной биогеографической области (Одесский залив –  $46^\circ\text{с.ш.}$ ). При этом внешние факторы обеспечивают развитие для 7–8 экологически однородных биогеографических фитокомплексов ( $F1b\text{--}F7b$ ), что следует из совокупности свето-температурных ресурсов. Так, при уровне поступления свободной энергии в годовом цикле в сумме  $\Sigma R \approx 90\text{--}95$  ккал/см<sup>2</sup>, за период активной вегетации поступает до 80% или около  $\Sigma R \approx 70\text{--}75$  ккал/см<sup>2</sup>. Это обеспечивает общую годовую амплитуду  $\Delta T \approx 1,5\text{--}21,5^\circ\text{C} \approx 20^\circ\text{C}$ , при амплитудах  $T$  за период активной вегетации  $\Delta T \approx 2\text{--}21,5^\circ\text{C} \approx 19,5^\circ\text{C}$ .

При моделировании условий развития для фитокомплексов  $F1b\text{--}F7b$ , руководствовались положениями, детально проанализированными в более ранних работах [11,12,26,26]. Так, при оптимизации экологических диапазонов по  $T$  разных  $F_i$ , использовали следующую систему правил, формально определяющих как условия

функционирования, так и порядок смены последовательно развивающихся комплексов фитоценоза.

*Первое.* Перестройка качественной структуры происходит скачкообразно, в качестве критерия ее начала использовалось значение функции  $\mu/\mu_m \approx 0.7-0.8$  (см. далее).

*Второе.* Каждый из фитокомплексов  $F_i$  устойчиво развивается в температурном диапазоне близком к  $\Delta T \approx 2.0-3.5^\circ\text{C}$ , хотя сами границы диапазона колебаний по  $T$  могут быть существенно больше [11,12,27].

*Третье.* Развитие  $i$ -го, экологически однородного  $F$ -комплекса должно обеспечиваться минимальным поступлением "кванта" солнечной энергии в количестве  $\Sigma R \approx 8-10$  ккал/см<sup>2</sup>. При этом полный цикл развития  $F_i$ -комплекса происходит вне зависимости от календарного периода поступления такой  $\Sigma R$  (принцип накопления изменений) [11,12].

Результаты моделирования сведены в таблицу, где приведены и оценочные значения для множителя функции  $\mu/\mu_m$ , полученные по экспериментальным данным [26,27]. Это позволяет получение численных значений кривых отклика  $F_i$  фитокомплексов  $\mu/\mu_m$ , в случае восстановления их величин.

Отметим, что характеристики осеннего фитокомплекса  $F7b$ , для периода хаотизированного развития экосистемы в осень, носят неопределенный характер, т.к. в развитии участвуют все систематические группы, при отсутствии действия упорядочивающих  $L$ -факторов (см. выше). При этом энергетические ресурсы, в состоянии обеспечить развитие, по крайней мере, одного из фитокомплексов  $F_i$  и составляют для осеннего гидробиологического сезона  $\Sigma R \approx 7-9$  ккал/см<sup>2</sup>.

Таблица 1 - Температурная характеристика экологических диапазонов толерантности экологически однородных фитокомплексов ( $F1b-F7b$ ) бореальной зоны для  $46^\circ\text{с.ш.}$  (Одесский залив) и множители функции  $\mu/\mu_m$  (1/сут), по результатам модели

$F$ - компл.	Диапазон толерантности $T_{\text{эк}}$				Q	$\mu_m, \text{сут}^{-1}$		Экол-я х-ка	Сезоны
	$T_{\text{min}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{opt}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$		min	max		
$1^*$	2	3	4	5	6	7	8	9**	10***
$F1b$	1,5	4,5	3,1	2.2	2	0.1	3	<i>Bacill</i>	Весна
$F2b$	3,4	7	5,5	3.0	2	0	5	<i>Bacill</i>	Весна
$F3b$	6	12	9,2	3.5	3	0	4	<i>Bacill</i>	Весна
$F4b$	10	17,2	12	4.5	1,5	0	3	<i>Dinofl</i>	Лето
$F5b$	14	20,5	17,5	5	2,25	0	2	<i>Dinofl</i>	Лето
$F6b$	18	22	20,5	5.5	2,25	0	1	<i>Нано-</i>	Лето
$F7b$	16	21	—	5.0	—	—	4	<i>Смесь</i>	Осень

*Прим.:* (по колонкам), \*№1 – обозначение  $i$ -го  $F_i$  фитокомплекса (цифрами – порядковый номер в данном сукцессионном ряду, буквами – биогеографическая область, b – бореальная);

\*\*№9 – доминирующие группы микроводорослей (*Bacill.* – диатомовые, *Dinofl* – перидиниевые, нано – микроорганизмы с преобладанием жгутиковых, из размерных фракций пико и наннопланктона (при характерном диаметре  $d_{\text{ср}} \leq 24$  мкм);

\*\*\*№10 – гидробиологический сезон (по Богорову–Ширшову), другие обозначения по тексту.

Приведенные количественные характеристики диапазона экологических температур фитокомплексов ( $F1b-F7b$ ) бореальной зоны  $\Delta T_{\text{эк}}$ , и значения множителя  $\mu_m$ , получены по расчетным значения  $\Sigma R, T$ -параметров, методом оптимизации в моделях 1 6–8 (см. выше). Их совокупность соответствует фундаментальному набору

показателей сукцессивных рядов фитокомплексов ( $F1b-F7b$ ), специфичных для каждой широтно-климатической зоны и биогеографических областей [3,4,8]. При этом сочетание этих базовых характеристик с вектором движения потоков массы веществ из зоны ВДС в область криосферы Вернадского, детерминирует и характер биологических процессов развития для  $F_i$ , в каждой точке гидросферы. В свою очередь, деятельность микропродуцентов определяет особенности развития сопряженных с ними трофически или функционально компонент биоты – зимогенной микрофлоры и микрозоопланктона, включенных последовательно в цикл первичного круговорота [11,12], что является предметом последующих исследований.

Совокупность приведенных количественных характеристик по  $\Delta T$  и  $\Sigma R$  приведенных выше, соответствует фундаментальному набору количественных показателей, специфичного для каждой широтно-климатической зоны. Ресурсы климатических зон, в сочетании с вектором движения потоков веществ из ВДС в область криосферы Вернадского, полностью детерминируют характер биологических процессов развития всех экологически однородных фитокомплексов, в каждой точке гидросферы. Это в свою очередь, определяет тип развития сопряженных с ними трофически (функционально) компонентов биоты – зимогенной микрофлоры и микрозоопланктона, включенных в циклы первичного круговорота [11,12,25–27].

Еще раз отметим, что сопряженность изменений  $R, T$ -факторов представляет единый, динамический процесс, задаваемый циклом поступления свободной энергии  $R$  в систему, с ее последующим накопления в форме тепла и диссипацией [11,12,26, 30], параметры, которых, целиком регулируются внешними (астрономическими) факторами. Но, согласно такой же функциональной связи между ними, получаемые закономерности широтного распределения отклика автотрофов на их моно- и/или мультипликативное влияние, при корректном формулировании исходных положений, всегда должно соответствовать: а) зональному распределению свойств водных масс [3,4], б) закономерностям инсоляции на поверхность гидросферы [11,18–20]. Эти свойства, с одной стороны, определяют рамки развиваемой в предлагаемой работе общей концепции регулирования деятельности планктонных комплексов, с другой – позволяют объективно контролировать корректность любых выкладок.

**Энергетическая шкала и линейное время при анализе сукцессий.** Из сравнительного анализа данных на 1а,в, 1б,г, а также рис. 5, следует заключение, что традиционно применяемая шкала времени "по часам", для анализа энергозависимых явлений – подчиняющихся законам сохранения – полностью непригодна.

В первую очередь, этот вывод относится к методам анализа автотрофных компонент планктона, но, он же распространяется и на все приложения по характеристикам трансформации термодинамических свойств биотопов (верхней части ВДС) под действием  $R$ -фактора или трофически (функционально) связанных с микропродуцентами групп биоты (микрозоопланктон и значительной части сообществ микробиоты). Очевидная непригодность традиционной шкалы линейного времени ("по часам"), определяется тем, что любые функциональные связи, реально существующие в водной системе, совершенно произвольно трансформируются до их полной неузнаваемости (см. рис 1 и 4). Понятно, что искажение первичной информации происходит совершенно по разному, в различных частях периода активной вегетации, т.е. в соответствии с ходом цикла поступления  $R_i$  в систему. Энергетическое представление экспериментальных данных по динамике развития фитокомплексов, процессам первичного продуцирования ОВ, а также сопряженных с ними трофически компонент биоты, соответствует введению естественного масштаба, изначально присущего энергозависимым явлениям. Поэтому мы считаем, что энергетические шкалы, приводимые по тексту настоящей работы (рис. 1, 2 и 4), характеризуют

естественный масштаб исследуемых процессов и являются необходимым условием корректности анализа процессов биологического развития.

Но еще более важным, является вывод о идентичности процессов протекающих как в термодинамической (водная среда), так и саморегулируемой (биота) подсистемах ВДС (см. рис. 1 и 5), для разных по условиям широтно-климатических зон [11,12]. Это с очевидностью следует при сопоставлении как динамики, так и устойчивости количественных соотношений между процессами накопления  $\Sigma R_i$  и динамикой  $T_s$ , с изменениями в термодинамической и биотической (по функции отклика  $\mu/\mu_m$ ) подсистемах ВДС.

Например, согласно эмпирической зависимости  $T_s = f(\Sigma R_i)$ , полученной для линейного участка этой кривой (см. рис. 1 в,г 4), для широт Одессы (март–август) или Мурманска (апрель–июль) среднедекадная  $T_s$  поверхностного слоя регулируется по единому закону

$$T_s = 0.312 \Sigma R_i - 3.4 , \quad (9)$$

где:  $\Sigma R_i$  – сумма поступившей в воду  $R_i$  с начала текущего года, ккал/см<sup>2</sup>.

Очевидно, что положение об однородности распространяется и на другие энергозависимые процессы и в первую очередь, на деятельность автотрофов (см. выше). Такой вывод очевиден, но, только исходя из единого генезиса движущих сил.

Когда эквивалентность количественных зависимостей разных широт традиционно представлена в форме, с принудительным предварительным искажением первичной информации при введении линейной шкалы времени (см. рис. 1), то количественный анализ, как правило, подменяется фантазиями на отвлеченные темы, например, каким образом называть то или иное явление.

**Характеристика развития фитоценозов Черного моря по моделям.** По результатам моделирования функции  $\mu/\mu_m$  для Одесского залива (Черное море, широтная зона 46°с.ш.) нами получен ряд положений, относящихся к характеристике периода активной вегетации фитоценологических комплексов, основанных исключительно на модельных результатах (см. рис. 1б,г). При выводе положений и их интерпретации, руководствовались, с одной стороны, заключением о однородности развития энергозависимых процессов в разных широтных зонах и в первую очередь, в деятельности автотрофов (см. выше), с другой – результатами анализа функции  $\mu/\mu_m$ , в целом, практически, аналогичным полученным для основного модельного объекта – Баренцева моря, учитывая их автомодельную форму.

1. В первую очередь отметим, что закономерное распределение наиболее характерных черт динамики условной математической функции – модельного отклика  $\mu/\mu_m$ , наблюдается исключительно по энергетической шкале  $\Sigma R$ , а не по линейному отображению времени (“по часам”), что следует из рис. 1.

2. Начало активной вегетации автотрофных компонент планктона на широте Одесского залива Черного моря, согласно данным моделирования, вполне вероятно, начинается при поступлении в водную среду энергии  $R$  на уровне  $\Sigma R \approx 12-15$  ккал/см<sup>2</sup> – в начале марта. Причем, это близко к уровню  $\Sigma R$  характерному для начала вегетации автотрофов в Баренцевом море, при соответствующем сдвиге календарных сроков примерно на 1 месяц линейного времени.

3. Момент перехода фитоценоза в Одесском заливе в фазу развития с устойчивым подавлением процессов функциональной активности и роста биомасс автотрофов на 20% и более, наступает при величине поступления солнечной энергии в биотоп  $\Sigma R_c$  около 70 ккал/см<sup>2</sup>. При этом календарный срок накопления этого количества энергии устойчив и приходится на середину июля–начало августа.

4. Максимальное проявление эффекта “подавления” на широте Одесского залива

(до 100%), по модельным данным приходится на момент непосредственного перехода от летнего к осеннему гидрологическому сезону (конец июля–1-я декада августа), при величинах  $\Sigma R_c \approx 75$  ккал/см<sup>2</sup> (см. рис. 1г). Практически, календарные сроки максимальных проявлений эффекта в Баренцевом и Черном морях – совпадают.

5. Период с существенными проявлениями эффекта "подавления" продолжается примерно 1–2 декады, а восстановлений функций автотрофов, со снижением эффекта и 80%-го восстановления максимума  $\mu/\mu_m$ , наступает в конце августа–начале сентября. Это происходит при поступлении  $\Sigma R_c \approx 80$  ккал/см (рис. 1г).

6. К моменту окончания фазы "чистой воды" уровень солнечной энергии для широты Одесского залива вполне достаточен для формирования и развития осенней (хаотизированной) вспышки автотрофных компонент планктона. Окончание фазы "чистой воды", по существу, соответствует началу осеннего гидробиологического сезона (август–октябрь) в этих широтах.

7. В данной широтной зоне (северный берег Черного моря) период вегетации заканчивается на уровне поступления энергии около  $\Sigma R_c \approx 85–90$  ккал/см<sup>2</sup> (конец октября), что примерно на 30 ккал/см<sup>2</sup> больше, чем для южного берега Баренцева моря. Соответствующий сдвиг календарных сроков составляет 1.0–1.5 календарных месяцев линейного времени.

8. Всего на протяжении каждого из годовых циклов поступления солнечной энергии, при суммарном поступлении  $\Sigma R \approx 85–95$  ккал/см<sup>2</sup>, характерном для широты Одесского залива, на этой акватории (вполне вероятно), происходит последовательное развитие 7–8 фитокомплексов ( $F1b–F7b$ ), характерных для бореальной зоны (см. табл.). Причем, по аналогии с фитоценозами Баренцева моря, их развитие полностью детерминировано внешними факторами. Во-первых, согласно температурным условиям в биотопе ВДС, при амплитуде  $\Delta T$  в период вегетации около  $\Delta T \approx 19–20^\circ\text{C}$ , каждый из комплексов развивается в достаточно узком диапазоне  $\Delta T \approx 2–3^\circ\text{C}$ , что вполне соответствует и условиям развития для Баренцева моря [26]. Во-вторых, учитывая положение о "квантовании" развития автотрофов поступающей в систему энергией, условиями накопления  $\Sigma R$ , а также ее величинами [11,12], при энергии  $\Sigma R \approx 8–12$  ккал/см<sup>2</sup> обеспечивающей развитие каждого из фитокомплексов ряда ( $F1b–F7b$ ) данной зоны бореальной биогеографической области, в промежуток март–октябрь могут развиваться около 7–8 фитокомплексов. Согласно результатам моделирования: 3 – весенних, 3 – летних и 1 – хаотизированный осенний фитокомплексы ( $F1b–F7b$ ).

9. В процессе развития автотрофных компонент планктона Черного моря, добавочные 30 ккал/см<sup>2</sup> за год, дополнительно поступающие в водную среду в соответствии с широтной зоной (по сравнению с Баренцевым морем), приводят к формированию типичного для умеренных широт бимодального сценария развития, включая и трофически сопряженные группы микроорганизмов (бактерио- и зоопланктон).

**Закономерности развития фитокомплексов в условиях T-трендов.** Помимо приведенных выше положений, одним из наиболее важных результатов, полученных при моделировании развития планктона в разных широтных зонах (по 1–8), мы считаем формальное доказательство, что влияние L-факторов на биотические компоненты морских экосистем не сводимо ни к тому или иному критическому значению (абсолютной величине), ни к любой из текущих величин. Показано, что не менее существенное влияние заключается в самом факте однонаправленных изменений в водной среде – трендов (см. рис. 1 и 3, 4).

Конкретно это показано для температурного фактора, но вероятно, распространяется и на любые виды действующих на биоту факторов, относящихся к монодоминирующим (L-факторам). Все они имеют соответствующий континуум

действия на биоту в градиенте: трофический–повреждающий–летальный [16]. Поэтому к важным характеристикам, определяющим наиболее вероятное проявление тех или иных эффектов, в соответствии с динамикой  $L$ -факторов являются их первая и вторая производные – скорость ( $dL/dt$ ) или ускорение ( $d^2L/dt^2$ ) в водной среде, например, полученные выше для  $T$ -фактора. При этом совершенно не исключается вариант, что некоторые из форм воздействий или факторов, в случае их стабилизации на любом уровне, могут не оказывать никакого влияния на биоту.

Поэтому, в ходе моделирования математической функции, отражающей условия реализации потенциала  $\mu/\mu_m$ , сформулировано общее правило, поясняющее причины возможного проявления максимального эффекта, в данном случае, подавления активности автотрофных сообществ ходом сезонной динамики  $T$ . Оно названо нами правилом "схождения" кривых температурной оптимизации, а его смысл сводится к формулировке: фазовые сдвиги разных форм температурной адаптации автотрофных комплексов, отображаемые функциями вида  $(T_{\min}, T_{\text{opt}}, T_m) = f(T)$ , при их сближении на критическую величину  $\Delta T = (T_{\text{opt}} - T) \approx 0.5^\circ\text{C}$ , приводят к максимальному проявлению эффекта, заключающегося в подавлении проявления жизнедеятельности некоторых компонент планктонных сообществ.

Выделим, что в приложениях для морских экосистем, при развитии биоты за годовые циклы поступления  $R_c$ , по своему содержанию, это правило достаточно точно формализует ряд закономерностей. В первую очередь, это причины трансформации одномодального сценария сукцессионного развития планктона в бимодальный – с парой полуволин развития. Причем, обратная свертка из бимодального в одномодальный, также возможна, но, уже при действии взаимоисключающих условий, соответствующих широтному распределению показателей инсоляции,  $\Sigma R$  и  $T$  в гидросфере, наблюдаемым реально по особенностям процессов развития планктона [1,2,3,8]. С использованием физико-географической модели 1 и 6–8, действие этого правила можно "наблюдать" и теоретически – методом моделирования, например, проверив реализацию  $\mu/\mu_m$  для объектов вдоль меридианов – от полюса к полюсу.

Отметим, что сложность практического применения волновой системы сезонных сукцессий планктонных сообществ морских экосистем Богорова–Ширшова общеизвестна [1,2,3]. Не менее известно и нарастание сложности интерпретации, например, в приложении к приполярным, а тем более, полярным экосистемам, при анализе формирования структуры фитоценозов этих экстремальных областей гидросферы [31,32]. Тем не менее, универсальность волнового сценария сукцессий в этих областях показана еще П.П. Ширшовым [2,8], даже в центральных областях Ледовитого океана. Соответственно, пересмотру она не подлежит, но, нуждается в ряде уточнений и детализации по климатическим зонам, что и является задачей дальнейших разработок данного направления.

**Заключение.** Схема волновой циклической сукцессии планктонных сообществ Мирового океана Богорова–Ширшова, упорядочивающая представления о последовательности экологических событий и биологических сезонах в гидросфере, для области распространения гелиогенных структур в ВДС, уточнена введением вполне материальной действующей силы. Она вызвана не величиной или уровнями, а самим фактом существования сезонного хода изменений  $T$  среды. При этом тренды  $T$  являются передаточным звеном воздействий солнечной энергии  $\Sigma R$  на свойства ВДС и его биоту. Особенности действия движущей силы  $\Sigma R, T$ -факторов и ее масштаб, в ряду других факторов определяющих порядок и развитие направленных процессов в планктонных комплексах морских экосистем, вероятно, делают ее доминирующей. Это следует из способности микроорганизмов–автотрофов обходить влияние любого реального уровня температуры, повреждающего влияния солнечной энергии или их



стабилизации, а также возможность перехода на альтернативные субстраты и др.

1. Энергетическая форма представления для энергозависимых процессов, характеризуемых экспериментальными данными по динамике фитокомплексов, процессам первичного продуцирования ОВ, а также сопряженных с ними трофически компонентов биоты, соответствует введению естественных масштабов в процедуру анализа. Энергетические шкалы типа  $\Sigma R$  для текущего солнечного цикла, характеризуют естественные масштабы и скорости исследуемых процессов, являясь и необходимым условием корректности анализа явлений биологического развития.

2. На протяжении всего периода активной вегетации, комплексы автотрофов развиваются в условиях "светового насыщения", что определяет специфику наблюдаемых связей биоты с величинами солнечной энергии – отсутствие таковой. Это объясняется в опосредованном, через  $T$ , участии текущих величин  $R$  на деятельность микропродуцентов – через теплосодержание фотической зоны ВДС. Соответственно, устойчивых прямых связей между энергозависимыми процессами и  $R$  в процессах биосинтеза не выявляется, в отличие от функциональных зависимостей с  $T$ -фактором и запасом накопленной в системе  $\Sigma R$ . Помимо этого, особенности адаптации микропродуцентов к  $T$ , приводят к сглаживанию таких зависимостей.

3. К одному из важных результатов полученных в ходе моделирования показателей развития автотрофных компонент, относится формальное доказательство, что влияние  $L$ -факторов на биотические компоненты морских экосистем не сводится ни к критическому значению (абсолютной величине), ни к любой отдельно взятой из текущих величин. Не менее существенное влияние факторов заключается в самом факте устойчивости однонаправленных изменений, возможно, включающих разнообразие свойства водной среды – т.е. трендов динамики.

4. Циклическое развитие и волновая форма интегрированных процессов биосинтеза для энергозависимых компонент планктонных сообществ, за годовые циклы поступления  $R$  в водную среду, по своему содержанию достаточно точно формализуется правилом схождения кривых оптимизации, фиксирующего характерный ряд закономерностей динамических процессов такого рода. В первую очередь, к таким относятся причины трансформации (редукция или разрыв) одномодального сценария развития компонент планктона в бимодальный, при наличии фаз "чистой воды". По ходу этого явления происходит полная потеря регулирования динамики  $T$  биотическими компонентами. В конечном итоге, этот процесс заканчивается формированием пары сопряженных полувольт развития микропродуцентов, разрывающих вону развития на две части в период активной вегетации фитоценозов.

5. Обратная свертка: из бимодального в одномодальный сценарий развития – возможна, и, происходит в действительности в характерных физико-климатических зонах – областях критических широт. Но, действующими факторами, в разных областях гидросферы (тропики–полярные широты), являются взаимоисключающие условия, которые, тем не менее, полностью соответствуют широтному распределению показателей инсоляции, суммарных  $\Sigma R$  и  $T$  в гидросфере.

6. Как и для фитоценозов Баренцева моря, развитие экологически однородных фитокомплексов ( $F1b-F7b$ ) бореальной зоны Черного моря, полностью детерминировано внешними факторами. По аналогии с уже выявленными закономерностями, во-первых, температурными условиям в биотопе, предоставляющими при амплитуде колебаний в период вегетации  $\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$ , для каждого из фитокомплексов диапазон  $\Delta T \approx 2-3^\circ\text{C}$ . Во-вторых, согласно положению о "квантовании" развития автотрофов поступающей в систему энергией, условиями общей величины накопленной  $\Sigma R$ . По аналогии с величинами полученными для Баренцева моря, при необходимом для полного развития каждого из фитокомплексов

$\Sigma R \approx 8-12$  ккал/см<sup>2</sup>, для широты Черного моря возможно обеспечение развития 7–8 фитокомплексов.

7. На модельных данных показано, что в процессе развития автотрофных компонент планктона Черного моря, добавочные 30 ккал/см<sup>2</sup>, дополнительно поступающие в водную среду (по сравнению с широтами Баренцева моря), приводят к формированию типичного, для умеренной зоны, бимодального волнового сценария развития (по Богорову–Ширшову), включая его распространение и на трофически сопряженные с микропродуцентами группы биоты (бактерио- и микрозоопланктон).

8. В отношении вероятных механизмов регулирования биоты к действию  $T$  отметим следующее. Согласно результатам моделирования и экспериментальным данным, процесс адаптации биоты к трендам  $T$  не носит выраженного преобладания эндо- или экзогенных механизмов: типа ”или–или”. Вполне очевидно, что параметры оптимизации ( $T_{\min}$ ,  $T_{\text{opt}}$ ,  $T_m$ ) имеют упреждающую настройку, показанную по отношению к динамике  $T$ . При этом с использованием энергетических шкал становится понятным, что это элементарный процесс – управляемый по чисто линейному закону ( $T_s = 0.312 \Sigma R_i - 3.4$  [°C]). С другой стороны, при потере регулирования, как это происходит в фазах ”чистой воды”, механизмы подстройки под текущую динамику  $T$  явно не справляются – это область хаотизации. В таких случаях регуляция, вполне вероятно, происходит исключительно за счет внешних факторов, вплоть до формирования нового комплекса фитоценоза и т.п.

**Выводы.** Нам представляется совершенно очевидным, что:

1. Необходимо введение в универсальную волновую схему сезонного развития планктонных комплексов Богорова–Ширшова, ряда уточняющих и детализирующих ее положений. В первую очередь, относительно:

– введения энергетических шкал, задающих естественные масштабы процессов биологического развития;

– выделения переходных широтно-климатических областей с трансформацией основного сценария развития микропродуцентов, в которых происходит редукция двухволнового сценария в одномодальные;

– указание действующей материальной силы процессов трансформации и ее закономерностей.

2. При этом схема циклических сукцессий, для ее корректного применения в прибрежных зонах и шельфовых областях окраинных морей (Русской Арктики), требует, помимо применения естественных масштабов для энергозависимых процессов, уточнения вероятностного спектра типов биосинтеза. Вероятно, включающего континуальное распределение от чисто ”приточных”, до чисто ”регенеративных” типов биопродукционных процессов. Совокупность промежуточных форм биосинтеза должна соответствовать их разнообразию, наблюдаемому в природе, а также особенностям действия механизмов трансформации фитоценологических структур.

3. Введение детализирующих положений в схему волнового сценария развития планктона Богорова–Ширшова, неизбежно должно сопровождаться расширением действия этой схемы, на сообщество микробиоты, составляющей такую же часть планктона морских экосистем, как и фито- или зоопланктон. Функционально или экологически однородные группы в сообществах планктона, также являются неотъемлемыми компонентами ВДС, как и любые автотрофные организмы или группировки зоопланктона учитываемые классической схемой Богорова–Ширшова.

Авторам понятно, что реальная действительность гораздо сложнее, чем она представляется в результате раздельного учета каких-либо отдельных, пусть даже и сверхважных факторов или эффектов. Тем не менее, сопряжение выявленных эффектов

влияния  $T$  и ряда наиболее общих закономерностей, достаточно широко известных для разных акваторий Мирового океана и объектов гидросферы, лично нас, убеждает в их реальности. Перечисленные выше закономерности, их эффекты, элементы или факторы, определяющие формирование направленного развития биоты и соответствующих им сукцессионных рядов динамики, как и сопряжение функционирования автотрофных и гетеротрофных компонент морского планктона в соответствии с широтами, свойствами климатических областей или другими факторами, конечно, даются в общем виде. Далее все эти закономерности будут постепенно уточняться.

### Литература

1. *Богоров В.Г.* Биологические сезоны полярного моря // Докл. АН СССР. 1938. - Т.19, вып.8. – С.639–642.
2. *Шуришов П.П.* Планктон арктических вод: Избранные труды. М.: Наука, 1982.– 256 с.
3. *Биология океана.* Т. 1. Биологическая структура океана/Отв. ред., д-р бил. наук М.Е. Виноградов. –М.: Наука, 1977. – 398 с.
4. *Биология океана.* Т. 2. Биологическая продуктивность океана / Отв. ред., д-р бил. наук М.Е. Виноградов. – М.: Наука, 1977. – 399 с.
5. *Михеева Т.М.* Сукцессия видов в фитопланктоне: определяющие факторы. — Минск: Изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 1983. — 72 с.
6. *Менишуткин В.В.* Имитационное моделирование водных экологических систем. – СПб.: Наука, 1993. – 154с.
7. *Kesh D, Sarkar A.K., Roy A.B.* Succession in a three-species food-chain model // Ecological Modelling. – 1996. – P. 211–219 (Kesh et al., 1996).
8. *Богоров В.Г.* Планктон Мирового океана. – М.:Наука, 1974.— 320 с.
9. *Сергеев Ю.Н., Колодочка А.А., Круммель Х.Д., Кулеш В.П., Савчук О.П.* Моделирование процессов переноса и трансформации веществ в море. - Л.: ЛГУ, 1979. – 296с.
10. *Кобленц-Мишке О.И., Ведерников В.И.* Первичная продукция / Океанология. Биология океана. Т. 2. Биологическая продуктивность океана. – М.: Наука, 1977. – С. 183– 209.
11. *Бардан С.И.* Динамика обменных процессов в планктонном сообществе в свете теории экологических модификаций // Экологические модификации и критерии экологического нормирования. Тр. межд. симп. СССР, Нальчик, 1–12 июля 1990 г. - Л.: Гидрометеиздат. 1991. - С.221 – 247.
12. *Bardan S.I.* The dynamics of ecosystems exchange processes in plankton community: a study based on the theory of ecological modification // Ecological modification and criteria for ecological standardization. Proceedings of the International symposium/ USSR, Nalchick, 1 – 12 June, 1990. – St.Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992. – P. 131–144.
13. *Лакин Г.Ф.* Биометрия: Учебное пособие для биол. спец. вузов. - М.: Высшая школа, 1990. – 352с.
14. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. - М.: Наука. 1987.- 432с.
15. *Ретеюм А.Ю.* Земные миры.— М.:Мысль,1988.—268с.
16. *Реймерс Н.Ф.* Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы).— М.: Журнал «Россия молодая». - 1994.—367с.
17. *Астраханцев Г.П., Менишуткин В.В., Петрова Н.А., Руховец Л.А.* Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. — СПб.: Наука, 2003. — 363 с.
18. *Заварзин Г.А.* Лекции по природоведческой микробиологии. - М.: Наука, 2004.— 348 с.
19. *Страшкраба М., Гнаук А.* Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование. - М.: Мир, 1989. – 376с.
20. *Злобин А., Нянишкене В., Путинцев Н.* Экосистемы водорослей в изменяющихся условиях среды обитания (Теория, эксперимент, предположения). -Вильнюс: Моклас, 1987. - 296 с.
21. *Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С.* Математическая биофизика.—

М.: Наука, 1984.—304 с.

22. Мирошниченко М.Л. Термофильные микробные сообщества глубоководных гидротерм//Микробиология. - 2004, том 73, № 1. – С. 5–18

23. Aruga Y. Ecological studies of photosynthesis and matter production of phytoplankton. I. Seasonal changes in photosynthesis of natural phytoplankton// Bot. Mag., 1965, vol.78. – P.280–288.

24. Aruga Y. Ecological studies of photosynthesis and matter production of phytoplankton. II. Photosynthesis of algae in relation to light intensity and temperature//Bot. Mag., 1965, vol.78. – P.360–265.

25. Бардан С.И., Бобров Ю.А., Дружков Н.В., Сербов Н.Г. Гидрофизическая и биоценотическая структура верхнего деятельного слоя: постановка проблемы, подходы, перспективы исследований. Препринт. г.Апатиты: Изд–во Кольского НЦ АН СССР.1988.— 46с.

26. Бардан С.И., Дружков В.А., Байтаз В.А. Челейкин С.А., Крымский А.В. Комплексный экологический мониторинг в губе Дальнезеленецкая (Баренцево море): летнее–осенний период 1989 г. Структурные характеристики. Препринт. Апатиты: Изд–во Кольского науч. центра АН СССР. 1990. - 37с.

27. Бардан С.И., Бобров Ю.А., Дружков В.А. Комплексный экологический мониторинг в губе Дальнезеленецкая (Баренцево море): летнее–осенний период 1989 г. Функциональные характеристики. Препринт. Апатиты: Изд–во Кольского науч. центра АН СССР. 1990. - 44 с.

28. Агатова А.И., Лапина Н.М., Торгунова М.И. Скорость трансформации органического вещества в экосистемах арктических морей // Арктика и Антарктика.- 2004,- Вып. 3(37). – С. 171–195.

29. Pomeroy L.R., Wiebe W.J. Temperature and substrates as interactive limiting factors for marine heterotrophic bacteria//Aquat. Microbiol. Ecol. - 2001. - Vol. 23. – P. 187-204.

30. Бардан С.И. Корнеева Г.А. Экологические факторы формирования и моделирование уровня гидролитической ферментативной активности водных масс на приустьевом взморье Оби и Енисея в зимний период // Изв. РАН. Сер. биол., 2004. - № 5. - С. 601–625.

31. Lampert W., Schober U. Das regelmässige Auftreten von Frühjars-Algenmaximum und Klimatischen Bedingungen und Wechselwirkungen zwischen Phyto und Zooplankton//Arch. Hydrobiol. – 1978. - V. 82, N 1-4. – P. 364—368.

32. Дружков Н.В., Макаревич П.Р. Пространственно-временная организация пелагического фитоценоза в открытых шельфовых водах Западной Арктики (Карское море)/Экосистемы пелагиали морей Западной Арктики. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. – С. 37–72.

#### **Формування бімодального сценарію сукцесії автотрофних компонент планктону в Баренцовому і Чорному морях і оцінка ролі температурного фактору. Бардан С.І., Сербов Н.Г.**

*За результатами моделювання відгуку автотрофів на сезонні зміни температури обговорюється її роль у формуванні сценарію циклічних сукцесій планктонних угруповань Баренцева і Чорного морів. Для аналізу використовується величина реалізації біопродукційного потенціалу ( $\mu/\mu_m$ ), яка розглядається як умовна функція. Обговорюються причини формування та наслідки існування фази “чистої води” в бімодальному сценарію розвитку планктону по Богорову-Ширшову*

**Ключові слова:** температура, фітокомплекси, сукцесія видів, фаза “чистої води”.

#### **Formation of a bimodal succession scenario of autotrophic components of plankton in the Barents Sea and the Black Sea and assessment of the temperature factor role. Bardan S.I., Serbov N.G.**

*Based on results of modelling of autotrophs responses to seasonal temperature variations, the role of temperature in formation of a scenario of cyclic successions of planktonic communities of the Barents Sea and the Black Sea is discussed. The quantity of bioproduction potential realization ( $\mu/\mu_m$ ), taken as a conditional function, is used for the analysis. Discussed are causes of formation and effects of existence of the clear water phase in the Bogorov-Shirshov bimodal scenario of plankton development.*

**Key words:** temperature, phytocomplexes, species succession, clear water phase

**Є.В. Обухов**, д. економ. н., **О.С. Корягіна**, бакалавр  
Одеський державний екологічний університет

## **ОЦІНКА ВНУТРІШНЬОРІЧНОГО РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ВОДИ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА**

*Проведені узагальнення реальної гідрометеорологічної та морфометричної інформації по акваторії Каховського водосховища, співставлення та аналіз результатів.*

*Ключеві слова:* водосховище, випаровування, температура, поверхня води, ділянка.

**Вступ та постановка проблеми.** Температура води – найбільш мінлива характеристика водосховища як в часі, так і в просторі [1,2], тобто за шириною, довжиною та його глибиною. Температура води є також найбільш універсальним екологічним фактором, який впливає на розподіл гідробіонтів та їх міграцію.

Термічний режим дніпровських водосховищ, які розташовані в трьох ландшафтних зонах, підпорядкований закону широтної зональності, залежить від фізико-географічних умов, морфометричних даних, антропогенних факторів, приточності, їх регулюючої спроможності. Термічний режим впливає не тільки на гідробіологічні процеси у водосховищах, а й на випаровування з них та втрати води і тепла [3].

Температурний фактор є вихідним при розрахунках випаровування, і надійність розрахунків при складанні водних балансів водосховищ суттєво залежить від його надійності.

Досліджуваннями температурного фактора як визначного при розрахунках випаровування з водної поверхні дніпровських водосховищ займались В.М. Шмаков [1,4-8], З.О. Вікуліна, О.О. Натруса [9], В.С. Вуглінський [10], К.М. Кокарева [11], Л.Г. Шуляковський [12] та інші. Питання температурного фактора відображені також в [2,13-16]. Відзначимо, що більшість результатів досліджень опублікована до 1990 р. і сьогодні вони потребують уточнення на основі нових гідрометеорологічних спостережень за минулі 30 років з урахуванням зміни клімату.

**Метою даної роботи** є аналіз та узагальнення даних натурних спостережень за температурою води по акваторії Каховського водосховища та його окремих складових і порівняння узагальнених результатів за різні терміни його експлуатації (1956-2010 рр.).

**Основними матеріалами досліджень** є систематизована гідрометеорологічна та морфометрична [17] інформація з Каховської гідрометеорологічної обсерваторії за 1988-2010 рр. та результати досліджень за минулі роки [1,9,13,14].

Каховське водосховище – шоста сходинка Дніпровського каскаду – здійснює сезонне та частково багаторічне регулювання стоку з коливаннями рівнів у межах 3 м. Площа водозбору – 482000 км<sup>2</sup>. Середньобогаторічний стік – 52,2 км<sup>3</sup>. Повна та корисна ємність водосховища – 18,2 і 6,8 км<sup>3</sup>. Площа дзеркала водосховища – 2155 км<sup>2</sup>, довжина його 230 км, максимальна та середня глибина – 36 і 8,4 м, максимальний статичний напір – 16,5 м, розрахунковий – 15 м, мінімальний – 8,9 м. Встановлена потужність при розрахунковому напорі – 351 МВт. Середньорічний виробіток енергії – 1420 млн кВт·год. Використовується для енергетики, водопостачання, зрошення, судноплавства, рибного господарства [3,5,14].

Береги водосховища високі, складені в основному із суглинків, безлісі, порізані глибокими ярами та долинами мілких степових річок, які сьогодні стали його затоками [15].

У водосховищі виділяють п'ять ділянок (рис.1). Перша ділянка від м. Н.Каховка до с. Бабіно – пригреблева, найбільш глибока зона шириною 5-6 км, глибиною від 13 до 25 м, а інколи і 36 м. Площа першої ділянки – 495 км<sup>2</sup>.

Друга ділянка від с. Бабіно до м. Нікополь шириною 8-15 км, переважаючі глибини – 10-12 м. Площа другої ділянки – 532 км<sup>2</sup>.

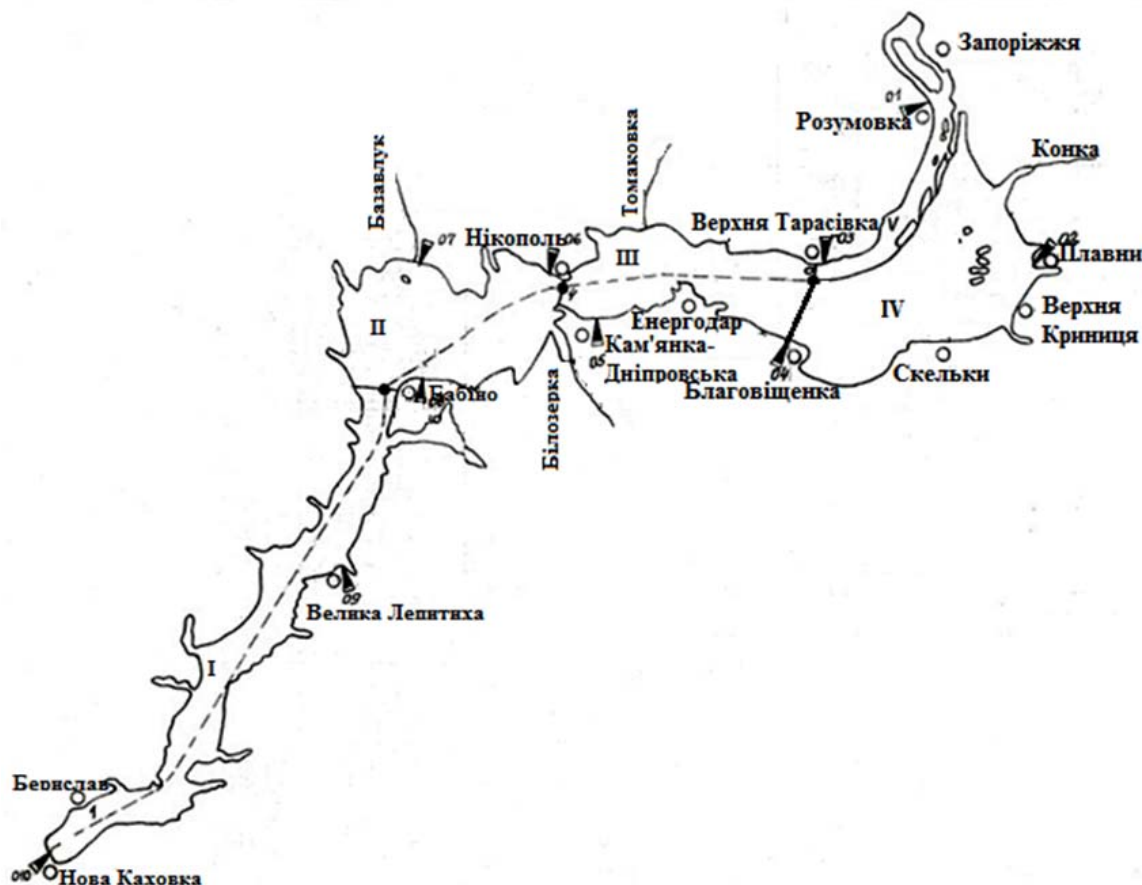


Рис. 1 – Каховське водосховище та його ділянки

Третя ділянка від м. Нікополь до с. В.Тарасівка шириною від 8 до 16 км з глибинами 8-10 м. Площа третьої ділянки – 365 км<sup>2</sup>.

Гідрологічний режим другої та третьої ділянок – перехідний від річкового до озероподібного.

Четверта ділянка від с. Благовіщенка до с. Плавні – заплавна, відокремлена від руслової – п'ятої ділянки – піщаним пасмом і має вигляд мілководного озера з переважними глибинами 3-5 м. Велика площа четвертої ділянки має глибини близько 1 м. Це район колишніх Кінських заплів. Площа четвертої ділянки – 690 км<sup>2</sup>.

Руслова – п'ята – ділянка розташована від с. В.Тарасівка до с. Розумовка [13-15]. Площа п'ятої ділянки 73 км<sup>2</sup>.

В основу дослідження покладено аналіз та узагальнення реальної та розрахункової гідрометеорологічної інформації для подальшого використання в практичних та наукових цілях.

**Результати досліджень та їх аналіз.** За 23 роки (1988-2010 рр.) експлуатації Каховського водосховища по його п'яти ділянках та їх гідрологічних постах були розраховані середньобогаторічні місячні температури води, середні, максимальні та мінімальні їх значення (табл.1).

В табл. 1 наведені також середньобогаторічні місячні температури води, розраховані за період 1956-1987 рр. [1]. Порівняння температур за вказані періоди

показало деяке потепління поверхні води по п'яти ділянках акваторії водосховища і практично по всіх місяцях, за винятком: листопада і грудня на першій ділянці; листопада – на третій; жовтня, листопада і грудня – на четвертій; травня – на п'ятій.

Максимальне збільшення температури в останні 23 роки на 2,3°C відбулося в квітні на першій ділянці, на 1,9°C – у березні на другій ділянці, на 2,1°C – знову у березні на третій ділянці, на 2,3°C – також у березні на четвертій ділянці, на 2,1°C – у жовтні на п'ятій ділянці.

Таблиця 1 – Середньобагаторічні місячні температури поверхні води по ділянках Каховського водосховища

Місяці Період	Каховського водосховища												Середня	Максимальна	Мінімальна
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII			
1. Н.Каховка															
1956-1987 рр. [1]	1,1	0,6	1,5	6,1	13,5	19,6	22,7	22,9	19,7	14,6	9,0	4,1	11,3	22,9	0,6
1988-2010 рр.	1,8	1,4	3,2	8,4	15,7	21,4	24,0	24,3	20,1	14,7	8,4	3,7	12,6	24,3	1,4
Різниця	+0,7	+0,8	+1,7	+2,3	+2,2	+1,8	+1,3	+1,4	+0,4	+0,1	-0,6	-0,4			
2. Нікополь															
1956-1987 рр. [1]	0,4	0,2	1,6	7,7	15,7	20,9	23,0	23,0	18,6	12,8	6,8	2,2	11,1	23,0	0,2
1988-2010 рр.	1,6	1,0	3,5	8,8	16,5	21,7	24,4	24,4	19,7	14,0	7,4	3,2	12,2	24,4	1,0
Різниця	+1,2	+0,8	+1,9	+1,1	+0,8	+0,8	+1,4	+1,4	+1,1	+1,2	+0,6	+1,0			
3. Нікополь															
1956-1987 рр. [1]	0,4	0,2	1,6	7,7	15,7	20,9	23,0	23,0	18,6	12,8	6,8	2,2	11,1	23,0	0,2
1988-2010 рр.	1,5	1,0	3,7	9,3	16,6	21,9	24,6	24,4	19,3	13,4	6,7	2,7	12,1	24,6	1,0
Різниця	+1,1	+0,8	+2,1	+1,6	+0,9	+1,0	+1,6	+1,4	+0,7	+0,6	-0,1	+0,5			
4. Плавні															
1956-1987 рр. [1]	0,4	0,2	1,6	7,7	15,7	20,9	23,0	23,0	18,6	12,8	6,8	2,2	11,1	23,0	0,2
1988-2010 рр.	1,3	1,1	3,9	9,6	16,8	22,1	24,8	24,2	18,6	12,3	6,2	2,1	11,9	24,8	1,1
Різниця	+0,9	+0,9	+2,3	+1,9	+1,1	+1,2	+1,8	+1,2	0	-0,5	-0,6	-0,1			
5. В.Тарасівка															
1956-1987 рр. [1]	0,4	0,2	1,4	7,3	15,4	21,0	23,3	22,7	18,8	12,3	6,2	2,0	10,9	23,3	0,2
1988-2010 рр.	1,9	0,8	2,2	7,4	14,8	20,6	23,6	23,9	19,9	14,4	7,5	2,7	11,6	23,9	0,8
Різниця	+0,5	+0,6	+0,8	+0,1	-0,6	-0,4	+0,3	+1,2	+1,1	+2,1	+1,3	+0,7			

Відзначимо, що середньомісячні температури води по ділянках акваторії змінювались від 0,6 до 22,9°C (1956-1987 рр.) і від 1,4 до 24,3°C (1988-2010 рр.) на першій ділянці, від 0,2 до 23,0°C (1956-1987 рр.) і від 1,0 до 24,4°C (1988-2010 рр.) на другій, від 0,2 до 23,0°C (1956-1987 рр.) і від 1,0 до 24,6°C (1988-2010 рр.) на третій, від 0,2 до 23,0°C (1956-1987 рр.) і від 1,1 до 24,8°C (1988-2010 рр.) на четвертій, від 0,2 до 23,3°C (1956-1987 рр.) і від 0,8 до 23,9°C (1988-2010 рр.) на п'ятій (табл.1).

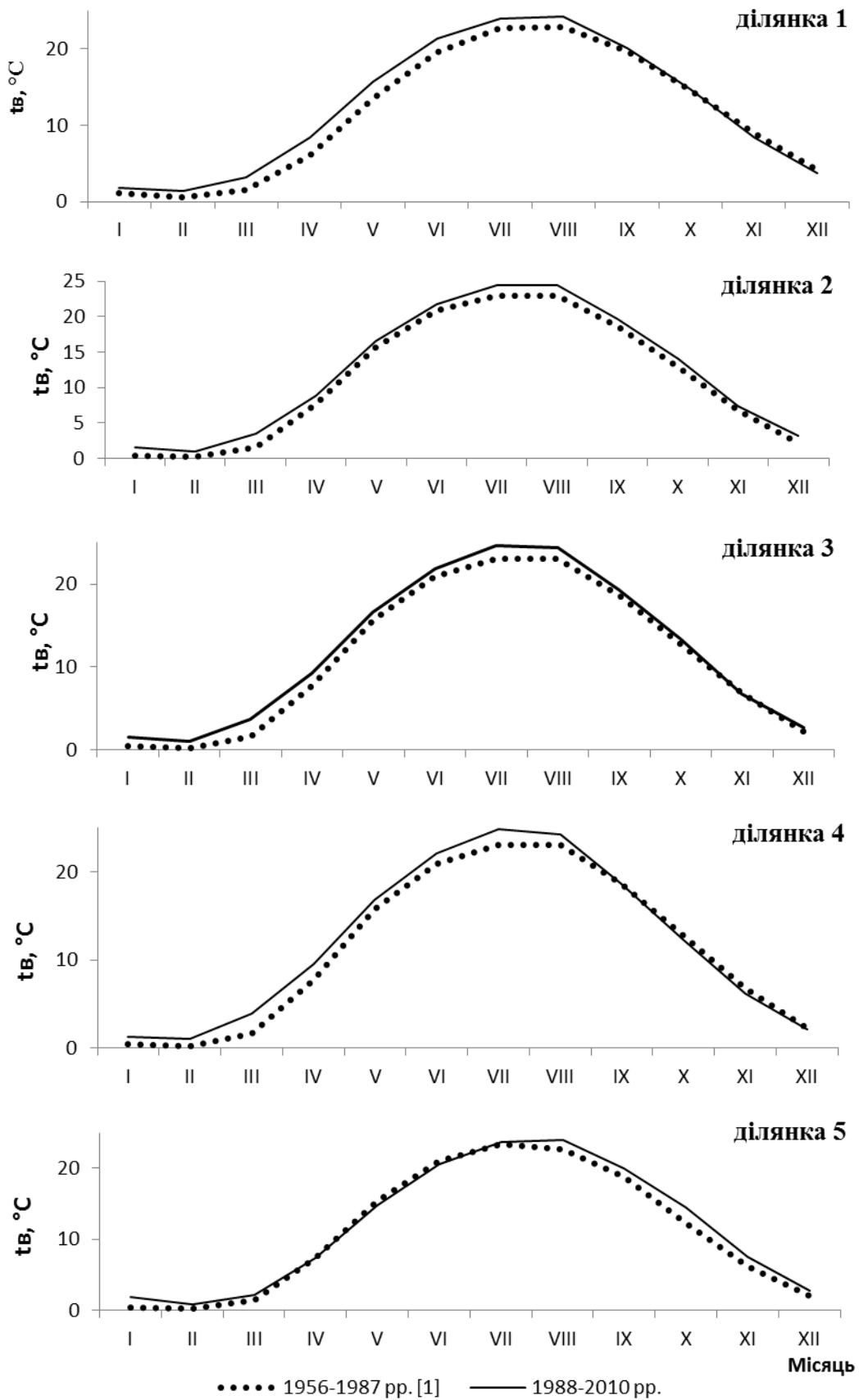


Рис. 2 – Внутрішньорічний розподіл середньобагаторічних місячних температур водної поверхні Каховського водосховища



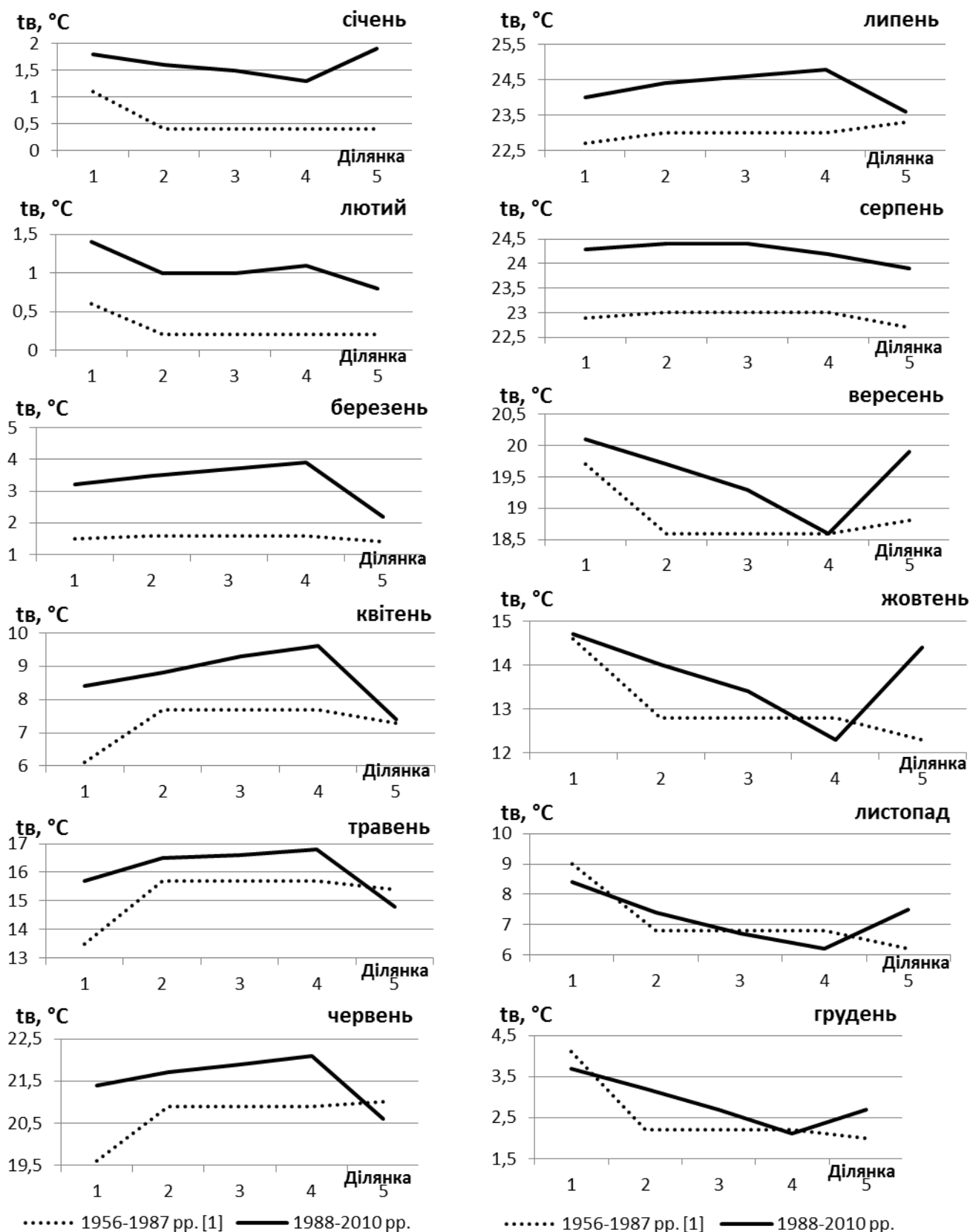


Рис. 3 – Середньобагаторічні температури поверхні води по місяцях та ділянках Каховського водосховища за різні розрахункові періоди

Внутрішньорічний розподіл середньобагаторічних місячних температур поверхні води по ділянках Каховського водосховища наведено також на рис.2. Аналізуючи розподіл температур поверхні води за вказані періоди, відзначимо його ідентичність, але з деяким перевищенням температур за останні 23 роки. Характерно, що найбільше розходження по температурах на першій-четвертій ділянках відноситься до перших трьох кварталів року, а на п'ятій ділянці навпаки – в четвертому кварталі.

Максимальні температури поверхні води за вказані періоди для першої ділянки відносяться до серпня місяця, для другої – до липня і серпня, для третьої і четвертої ділянок – до липня, а для п'ятої ділянки максимуми розійшлися між липнем і серпнем. Відзначимо, що максимальна температура поверхні води для всієї акваторії – 24,8°C визначена за період 1988-2010 рр. на четвертій ділянці, а 23,3°C (1956-1987 рр.) – на п'ятій ділянці.

На рис.3 наведений окремо по місяцях і по ділянках акваторії Каховського водосховища розподіл середньобагаторічної температури поверхні води за різні періоди його експлуатації.

Характер розподілу температури поверхні води в січні за відповідні періоди різниться: за 1956-1987 рр. – максимум на першій ділянці, за 1988-2010 рр. – на п'ятій, а мінімум на четвертій.

В лютому і серпні характер розподілу температури поверхні води вздовж акваторії за ті ж періоди ідентичний.

В інші місяці року розподіл температури поверхні води за аналогічні періоди експлуатації значно різниться, особливо по п'ятій і четвертій ділянках у вересні-грудні.

Цікава зміна температури поверхні води вздовж водосховища по його ділянках за період 1988-2010 рр. (рис.4), де розподіл температури води по місяцях значно різниться для кожної ділянки акваторії, особливо для мілководної четвертої.

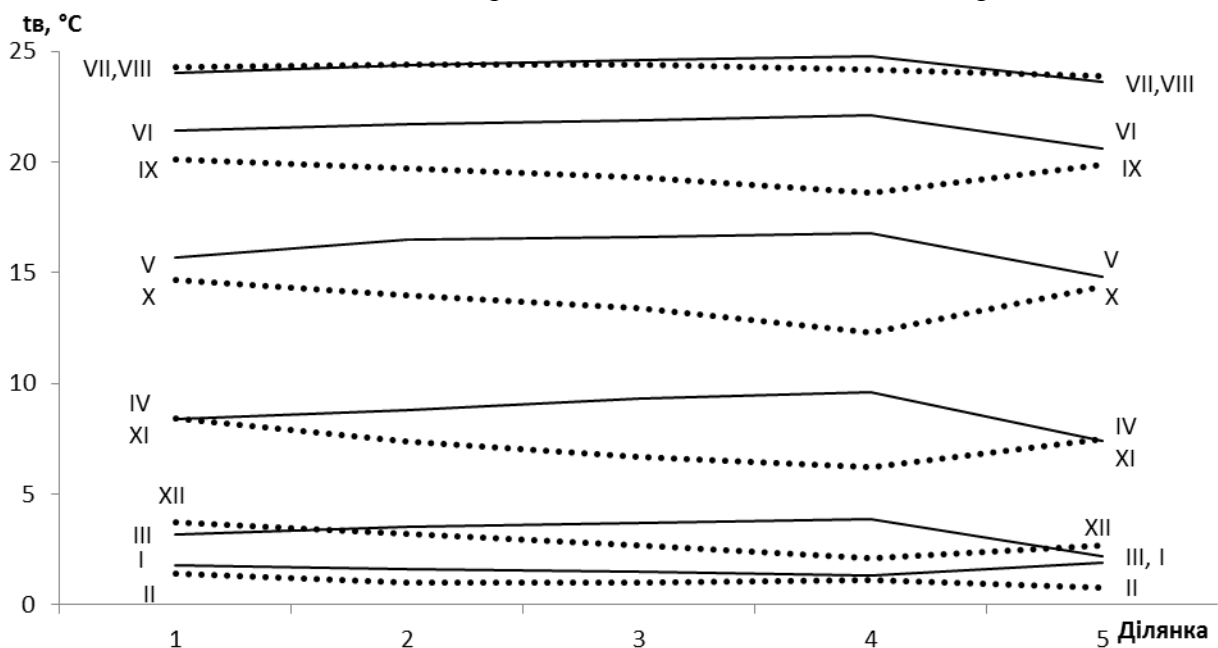


Рис. 4 – Середньобагаторічні місячні температури поверхні води по місяцях і ділянках Каховського водосховища за 1988-2010 рр.

Мінімальна температура поверхні води по акваторії водосховища за прохолодний період (IX-І місяці) зафіксована на четвертій мілководній ділянці, яка охолоджується більше і швидше, а максимальні температури поверхні води в цей період визначені на першій пригреблевій та на п'ятій русловій ділянках.

В III-VII місяцях максимум температури переміщується на четверту мілководну ділянку, яка швидше і більше прогривається в цей період, а мінімум – на п'яту руслову ділянку.

Таким чином в січні температура поверхні води знижується від Каховської греблі до мілководної зони (четверта ділянка), а в русловій п'ятій ділянці температура поверхні води в цей час зростає.

У лютому температура поверхні води знижується від першої до п'ятої ділянки.

У березні-липні відбувається збільшення температури поверхні води від греблі до мілководної четвертої ділянки та різке зменшення її на п'ятій русловій ділянці.

В серпні температура поверхні води плавно знижується від пригреблевої першої до п'ятої руслової ділянки.

У вересні-грудні характер зміни температури поверхні води аналогічний січню з ярко вираженим мінімумом на четвертій мілководній ділянці.

У роботі [1] такий розподіл пояснюється орієнтацією водойми і широтою місцевості, проточністю водойми, скидами вищерозташованої ГЕС, зміною площі поперечного перерізу по довжині водосховища, впливом приток та промисловими і побутовими скидами, швидкістю течії води.

В табл. 2 наведені подекадні температури водної поверхні по ділянках Каховського водосховища за 2007 р., в якому середньорічна температура становила 12,88°C і був найбільший об'єм випаровування (понад 2,36 км<sup>3</sup>) за період експлуатації водосховища.

Таблиця 2 – Температура води поверхневого шару на ділянках акваторії Каховського водосховища у 2007 р.

Декада	Місяць											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Перша ділянка												
1	3,1	1,6	1,4	6,9	11,9	23,7	23,3	25,2	23,9	18,4	11,8	4,8
2	3,4	2,4	3,0	8,5	16,6	24,8	24,3	25,6	21,2	16,2	8,3	3,6
3	3,3	1,3	5,2	10,5	23,9	22,7	26,4	25,9	18,8	14,3	6,0	26,5
Середнє	3,3	1,9	3,2	8,7	17,2	23,7	24,7	25,6	21,3	16,3	8,7	3,6
Друга ділянка												
1	2,2	1,1	1,1	7,9	13,1	24,1	24,1	25,4	23,4	17,7	10,6	3,6
2	3,0	1,8	3,3	9,5	17,9	24,8	24,6	25,7	20,3	15,3	6,7	2,7
3	3,2	0,8	6,0	11,5	25,1	23,3	26,8	25,9	17,9	13,5	4,4	1,7
Середнє	2,8	1,2	3,5	9,6	18,5	24,0	25,2	25,7	20,6	15,5	7,2	2,6
Третя ділянка												
1	1,8	0,6	0,6	8,5	13,3	24,3	24,5	25,9	23,7	17,7	9,4	3,3
2	3,0	1,5	3,5	9,9	17,5	25,0	25,3	26,1	19,6	14,9	5,5	1,8
3	3,0	0,4	6,2	11,5	23,4	23,9	26,8	26,4	17,5	13,0	3,5	0,9
Середнє	2,6	0,8	3,5	10,0	18,1	24,4	25,5	26,2	20,3	15,2	6,1	2,0
Четверта ділянка												
1	1,9	0,5	2,7	8,6	13,1	24,8	25,4	26,7	23,1	16,7	6,6	2,5
2	2,2	1,3	4,7	10,0	17,1	25,6	26,2	26,7	18,2	13,1	4,4	1,2
3	1,6	0,5	6,3	11,4	21,8	24,9	26,9	25,8	16,9	11,5	2,8	0,6
Середнє	1,9	0,8	4,6	10,0	17,3	25,1	26,2	26,4	19,4	13,8	4,6	1,4

Продовження табл. 2

П'ята ділянка												
1	1,7	0,9	0,8	4,6	10,6	21,3	23,1	24,6	22,8	17,7	11,2	3,7
2	1,7	0,6	1,5	7,1	13,1	22,6	23,7	23,8	20,9	15,9	8,4	2,8
3	1,5	0,3	3,0	9,2	20,3	2,1	24,4	24,5	18,7	14,1	4,8	1,2
Середнє	1,6	0,6	1,8	7,0	14,8	22,3	23,7	24,3	20,8	15,9	8,1	2,6
В цілому по водоймі												
1	2,2	0,9	1,6	7,9	12,8	24,2	24,4	25,8	23,5	17,5	9,4	3,5
2	2,8	1,7	3,7	9,4	17,1	25,0	25,1	26,0	19,7	14,8	6,2	2,3
3	2,6	0,7	5,9	11,2	23,3	23,8	26,7	25,9	17,7	13,0	4,1	1,3
Середнє	2,5	1,1	3,7	9,5	17,7	24,3	25,4	25,9	20,3	15,1	6,6	2,4

Порівняння температур поверхні води по ділянках та місяцях з середньорічною за 2007 р. показує особливості внутрішньорічного розподілу температур в характерний для експлуатації рік.

Каховське водосховище характеризується значними змінами площі поперечного перерізу акваторії і відповідно місткості по довжині. Особливий вплив на розподіл температури поверхні води водойми має його глибина [3,17].

Влітку рівень води в Каховському водосховищі різко знижується внаслідок значного забору води для зрошення, а також уповільнення течії до 1,6-1,8 см/с. Водобмін у водосховищі не перевищує 2-3 рази за рік [1,3,13]. Глибини водосховища змінюються від 1 до 36 м, а ширина його від 25 км (максимальна) до 9,3 км (середня).

Встановлено [1], що на Каховському водосховищі, як і на інших у каскаді, спостерігається горизонтальна стратифікація температури води, коли взимку, ранньою весною, у другій половині літа та восени вода біля греблі більш тепла ніж на верхніх ділянках водойми, а у другій половині весни і першій половині літа біля греблі вода холодніша, ніж на її верхніх ділянках.

У Каховське водосховище також безперервно надходять підігріті води з промислових підприємств м. Нікополя, м. Марганця, потужного Запорізького енергокомплексу, що також має свій вплив на термічний режим та розподіл температур води по акваторії.

#### **Висновки та рекомендації.**

1. Розташування ділянок в акваторії Каховського водосховища та їх морфометричні показники впливають на внутрішньорічний розподіл температури поверхні води за розглянуті періоди його експлуатації в залежності від місяця року.
2. За останні десятиріччя внутрішньорічний розподіл температури поверхні води по акваторії водосховища, особливо третя ділянка, знаходиться також під антропогенним впливом розташованих на берегах об'єктів промисловості та енергетики, що пояснює деяку різницю в розподілі температури води за розглянуті періоди експлуатації водосховища.
3. Наведені результати досліджень за останні 23 роки експлуатації водосховища підтверджують висновки в роботі [1] щодо розподілу температури води по його акваторії.
4. Одержані результати досліджень можуть бути корисними фахівцям – гідробіологам щодо потенційної біологічної продуктивності Каховського водосховища.

## Список літератури

1. Яцык А.В., Шмаков В.М. Гидроэкология. – К.: Урожай, 1992. – 192 с.
2. Справочник по водным ресурсам / Под ред. Б.И. Стрельца. – К.: Урожай, 1987. – 304 с.
3. Каховское водохранилище. Известные водоемы. Литература и статьи.[Электронный ресурс]– Режим доступа: <http://my-fisging.org.ru>>Kakhovskoe\_vodokhranilichhe...727.
4. Шмаков В.М. Особенности изменения гидрологического режима Днепра после возведения каскада водохранилищ // Вопросы гидрологии и водной экологии камских водохранилищ. – Пермь, 1995.-С. 82-91.
5. Шмаков В.М. Термические периоды на водохранилищах днепровского каскада // Гидробиологические исследования пресных вод.-К.: Наук.думка, 1985.-С.3-11.
6. Шмаков В.М., Шулипенко Т.Ф. Некоторые особенности гидрологического режима мелководий днепровских водохранилищ // Сб. работ по гидрологии. - Л.: Гидрометеоздат, 1982.-С.161-171.
7. Шмаков В.М. Гидроэкологические аспекты некоторых последствий воздействия каскада водохранилищ на Днепре – К., 1986. – Деп. В ВИНТИ 07.05.86, № 337 – В86.-13с.
8. Шмаков В.М. Гидроэкологические аспекты режима солнечной энергии в водохранилищах Днепровского каскада. – К.: Наукова думка, 1988. – 166 с.
9. Викулина З.А., Натрус А.А. Оценка испарения с поверхности водохранилищ по наблюденным гидрометеорологическим данным // Труды ГГИ. – 1976. – № 231.–С. 3-17.
10. Вуглинский В.С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 223 с.
11. Голубев В.С., Вуглинский В.С., Кокорева К.М. Методика расчета средней многолетней температуры поверхности воды в водоемах по данным наблюдений водоиспарительной сети // Тр. ГГИ. – 1981. – Вып.279. – С. 75-93.
12. Шуляковский Л.Г. Формула для расчета испарения с учетом температуры свободной поверхности воды // Тр. Гидрометцентра СССР.–1969.–Вып.53. – С.3-13.
13. Федоненко О.В., Осіпова Н.Б., Шарамок Т.С., Маренкова О.М. Гідроекологічний стан Каховського водосховища // Питання біоіндикації та екології. – Запоріжжя: ЗНУ, 2010. – Вип.15, №2. – С. 214-222.
14. Обухов Є.В., Корягіна О.С., Корецький Є.П. Вплив температурного фактора на показники випаровування з водної поверхні Каховського водосховища // Вісник Одеського державного екологічного університету. – Одеса, 2012. – Вип. 14. – С.160-169.
15. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. – Л.: Гидрометеоздат. 1969. – 83 с.
16. Клімат України / За ред. В.М. Ліпінського, В.А Дячука, В.М. Бабіченко.- К.: Вид-во Раєвського, 2003. – 343 с.
17. Атлас Днепровского бассейна. Каховское водохранилище. – Киевская военно-картографическая фабрика, 2004. – 48 с.

**Оценка внутригодового распределения температуры поверхности воды Каховского водохранилища. Обухов Е.В., Корягина Е.С.**

*Проведены обобщения реальной гидрометеорологической и морфометрической информации по акватории Каховского водохранилища, сопоставление и анализ результатов.*

**Ключевые слова:** водохранилище, испарение, температура, поверхность воды, участок.

**Score distribution of the surface temperature Kakhovka reservoir.**

**Obukhov E.V., Koryagina E.S.**

*Generalizations of the real hydrometeorological and morphometric information is conducted for the aquatorium of the Kakhovka reservoir, comparison and analysis of results.*

**Key words:** reservoir, evaporation, temperature, surface water, site.

## ОЦІНКА ЯКОСТІ ВОДИ РІЧКИ ДЕСНА ЗА КОМПЛЕКСОМ ГІДРОХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

*У статті представлені результати оцінки якості води річки Десна за багаторічний період та у роки характерної водності на основі розрахунків індексу забрудненості води (ІЗВ) і екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями, визначення придатності використання води для господарсько-питного споживання.*

**Ключові слова:** *якість води, індекс забрудненості води (ІЗВ), екологічна оцінка, роки характерної водності.*

**Вступ.** Визначення екологічного стану вод річки Десна є важливою прикладною задачею, поставленою міжнародною програмою по екологічному оздоровленню Дніпра, прийнятою у відповідності із меморандумом про співробітництво Білорусі, Російської Федерації та України (1995). Верховна Рада України прийняла постанову про Національну програму екологічного оздоровлення Дніпра і покращення якості питної води від 27 лютого 1997 року. Програма ПРООН – ГЭФ була розрахована на 2000-2004рр. і спрямована на розроблення системи заходів та механізмів їх впровадження з метою екологічного відродження трансграничної р. Дніпро.

**Вихідні передумови.** Річка Десна є другою (після Прип'яті) за водністю притокою Дніпра з водозбірною площею, яка дорівнює 88900 км<sup>2</sup>. Річка є трансграничною: 62% площі водозбору знаходиться у межах Російської Федерації [1], площа української частини водозбору дорівнює 33820 км<sup>2</sup>. За природним (фізико-географічним) районуванням р. Десна відноситься до Поліської провінції зони мішаних лісів. Густота річкової мережі невелика (0,2-0,3 км/км<sup>2</sup>), що пов'язано із наявністю крейдяних порід та карстових утворень [2]. Водні ресурси р. Десна характеризуються такими величинами: 11400 млн.м<sup>3</sup> у середній за водністю рік, 8900 млн.м<sup>3</sup> у маловодний рік, 6420 млн.м<sup>3</sup> у дуже маловодний рік [3]. У середній за водністю рік забезпеченість водою річки Десна складає 110-120 тис.м<sup>3</sup> за рік на 1 км<sup>2</sup> [4], тобто у 2-3 рази більше ніж на півдні України. Розподіл стоку між Росією та Україною також нерівномірний, оскільки основна частина стоку формується у Росії (табл. 1).

Таблиця 1 – Розподіл річного стоку водозбору р. Десна, виражений у відсотках від сумарного стоку р. Дніпро [5]

Росія		Україна	
Середній за водністю рік	Маловодний рік	Середній за водністю рік	Маловодний рік
13,8	16,9	5,8	3,2

Середній багаторічний приплив води із Росії становить 7600 млн.м<sup>3</sup> в рік, об'єм стоку, який формується у межах України, складає 3400 млн.м<sup>3</sup> [4].

У формуванні річного стоку значне місце посідає підземний стік, який складає 20-30% від річного у Чернігівській області. Саме Чернігівська область характеризується найбільшими прогнозними ресурсами підземних вод в Україні (8327 тис.м<sup>3</sup>/д) [6].

Площа російської території водозбору річки Десна складає 25257 км<sup>2</sup>. У її межах розораність становить 30,9%, лісистість – 43,8%, заболоченість – 2,3%. У межах України на сільськогосподарські угіддя припадає 60-70% від загальної площі. Частка ріллі у площі сільськогосподарських угідь складає 40-50% [5]. Торфово-болотні області і райони

складають близько 4.1% на території України. Частка лісів становить 20%, серед яких поширені сосна звичайна та ялина європейська.

**Стан проблеми.** Основними об'єктами техногенного впливу на гідрологічний, гідрохімічний та екологічний стан р. Десна є водойма-охолоджувач Смоленської АЕС та Курська АЕС, розташована на водозборі р. Сейм, хімкомбінат у м. Шостка [7]. Найбільший водозабір води здійснюється Деснянською водонапірною станцією, яка розташована в кількох кілометрах від гирла. Ця вода після споживання та очищення на Бортницькій станції аерації скидається у Канівське водосховище нижче м. Києва. Серед великих міст виділяються Брянськ (Росія) та Чернігів (Україна).

Поверхневі води відносяться до карбонатно-кальцієвого типу, якість яких достатньо висока. Локальне зниження якості вод спостерігається поблизу великих населених пунктів.

За хімічним складом протягом року води є прісними гідрокарбонатно-кальцієвими (під час межені гідрокарбонатними кальцієво-магнієвими) з середньою мінералізацією під час межені 345 мг/дм<sup>3</sup>, а під час водопілля - 150 мг/дм<sup>3</sup>. Внесок підземних вод у формування мінералізації річкових вод складає 39%.

За даними, наведеними у роботі [8] для періоду 1988-1995 рр., у верхів'ях вода характеризується як слабо мінералізована, гідрокарбонатно-кальцієвого типу, з сумою іонів 150 мг/дм<sup>3</sup>. Вниз за течією річки за рахунок припливу більш мінералізованих підземних вод сума іонів у межень становить 220-280 мг/дм<sup>3</sup>, причому зростання відбувається за рахунок хлоридів та сульфатів. У створі гирла р. Шостка загальна мінералізація досягає 370 мг/дм<sup>3</sup> (за рахунок іонів кальцію, магнію та НСО<sub>3</sub><sup>-</sup>). Після впадіння річки Сейм збільшується концентрація сульфатів. Надалі завдяки процесам самоочищення мінералізація зменшується, особливо сульфати. Якість води після впадіння р. Снов знов погіршується, але найбільший внесок у погіршення якості води річки Десна належить скидним водам міста Чернігова. Навіть після біологічного очищення вміст сульфатів сягає 50 мг/дм<sup>3</sup> при стабільному хлоридному стані 18-25 мг/дм<sup>3</sup> і загальній мінералізації 400 мг/дм<sup>3</sup>.

Вміст сполук азоту, фосфору у верхів'ях низький. Якісний стан вод погіршується від Єльні до Трубчевська, і потім при впадінні річок Шостка та Сейм. Режим біогенів відновлюється у створі с. Валовиці. Нижче Чернігова вміст азоту амонійного, нітратного та нітритного значно збільшується. Річка транспортує в каскад водосховищ Дніпра 35 г/с азоту мінерального та 10,5 г/с фосфору. За довжиною річки Десна виділяють три основні джерела формування органічної речовини: природний стік з боліт у витоках; ґрунтовий та дренажний стік із заплави та заплавної озера; господарсько-побутовий та зливовий стік з урбанізованих територій. За період з 1988-1995 рр. якісна оцінка екологічного стану річок змінювалася за довжиною річки від "задовільної" (м. Новгород-Сіверський) до "поганої" (с. Літки). На притоках річки Десна найгірший екологічний стан спостерігається на річці Шостка.

У межах Російської Федерації у 2001 році забір поверхневих вод з річки Десна становив 80 млн м<sup>3</sup>, а скид стічних вод - 72 млн м<sup>3</sup>. Найбільша кількість води з річки Десна, а саме 71,6% від загального об'єму, забирається на потреби електроенергетики (рис.1). Це стосується, насамперед, Смоленської АЕС та ТЕС у Жуківці. Другою галуззю господарства за ємністю водоспоживання є підприємства ЖКГ, які забирають 25,9% води із загального об'єму водозабору. На побутові та питні потреби йде 20,6%. Підприємствам ЖКГ належить 97,2% від загального об'єму скидних вод. При цьому недостатньо очищені води складають 95,8% від усього об'єму вод, які скидаються у річку Десна. На російській частині водозбору практично без очищення скидаються стічні води Брянської області. Скидні води річки Сейм, як правило, очищуються.

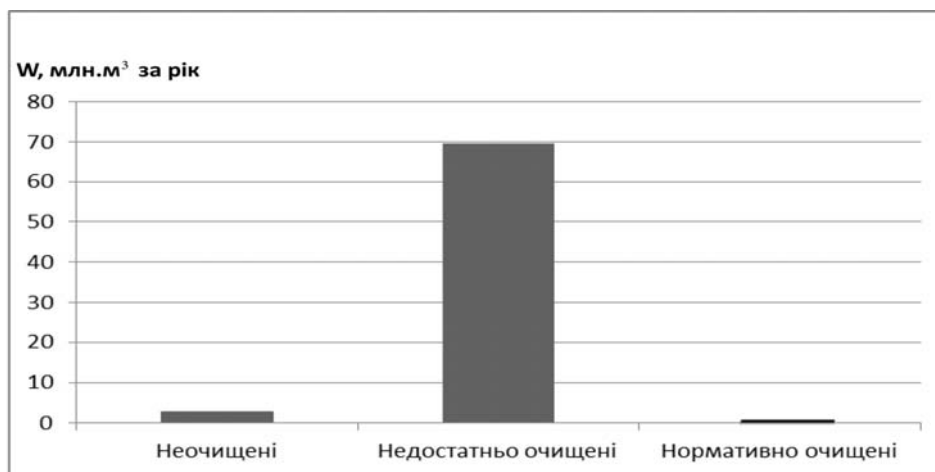


Рис. 1 – Порівняння об'ємів скиду стічних вод за ступенем їх очищення за 2001 рік (Російська Федерація)

Вилучення поверхневих вод р. Десна у межах України значно перевищує об'єми вод, які забираються на Російській території, і становить 435 млн м<sup>3</sup>. Об'єм стічних вод, що потрапляють у р. Десна на території України, становить 136 млн м<sup>3</sup> (2001р.), з яких недостатньо очищені води складають 95%. Якщо сума всіх скидів у річку на території Росії і України становить 216,72 млн м<sup>3</sup> на рік, то водозабір складає 515 млн м<sup>3</sup> на рік, з яких 322 припадає на водопостачання міста Київ.

Перенесення важких металів через кордон з Російською Федерацією на 2001 рік складає: залізо загальне 1022т за рік, мідь - 39,42 т за рік, цинк -18,64 т за рік.

У Чернігівській області найбільший антропогенний вплив припадає не на саму Десну, а на її притоки. Річка Убідь знаходиться у Чернігівській області (права притока Десни) і використовується як водоприймач осушувальних систем, а також для господарсько-побутових потреб. В цілому основними забруднювальними джерелами поверхневих вод Чернігівської області є: комунальні підприємства, підприємства молоко - і м'ясопереробної галузі. Найбільш часто перевищення ГДК питного та комунального споживання в водних об'єктах спостерігаються по залізу загальному, марганцю, фосфатах, БПК і іноді азоту амонійному.

В межах Чернігова розташоване підприємство ВАТ «Чернігівський річковий порт», яке здійснює перевезення вантажів водним транспортом, у результаті чого в межах Чернігівської області, на гідрологічних постах міста Чернігів періодично спостерігається перевищення ГДК по нафтопродуктах.

В межах Сумської області основну частину забруднювальних речовин Десна отримує з впадінням річки Шостка біля с. Пирогівка. Річку Шостку в основному забруднює КП ВУВКГ м. Шостка. У місці впадіння її в Десну найбільш часто фіксуються перевищення ГДК по нітратах, БПК, фосфатах, залізу загальному і марганцю. Крім того каналізаційна мережа Шосткінського району знаходиться в дуже поганому стані.

Згідно із даними, одержаними в результаті виконання програми ПРООН-Г'ЕФ, встановлено, що води басейну р. Десна за період 1990-2001рр. віднесені за мінералізацією до класу II, категорії 3, за станом якості «добрі», за рівнем забруднення «достатньо чисті». Основними забруднюючими речовинами вод річки Десна на території України є загальне залізо, марганець і фосфати [5].

**Метою роботи** є визначення екологічного стану вод річки Десна за даними про її хімічний склад для періоду з 1989 по 2007 рр.

Розглянутий період входить до багатоводної фази коливань річного стоку (рис.2). З означеної вибірки був розглянутий хімічний склад та якість вод для років характерної водності. До багатоводних років із забезпеченістю, меншою за 25% віднесені 1998,



1999 рр., до маловодних років - із забезпеченістю, що перевищує 75% , віднесені – 1996,2003. Середні за водністю роки (1992,2004) мають забезпеченість, яка знаходиться в інтервалі 25-75% .

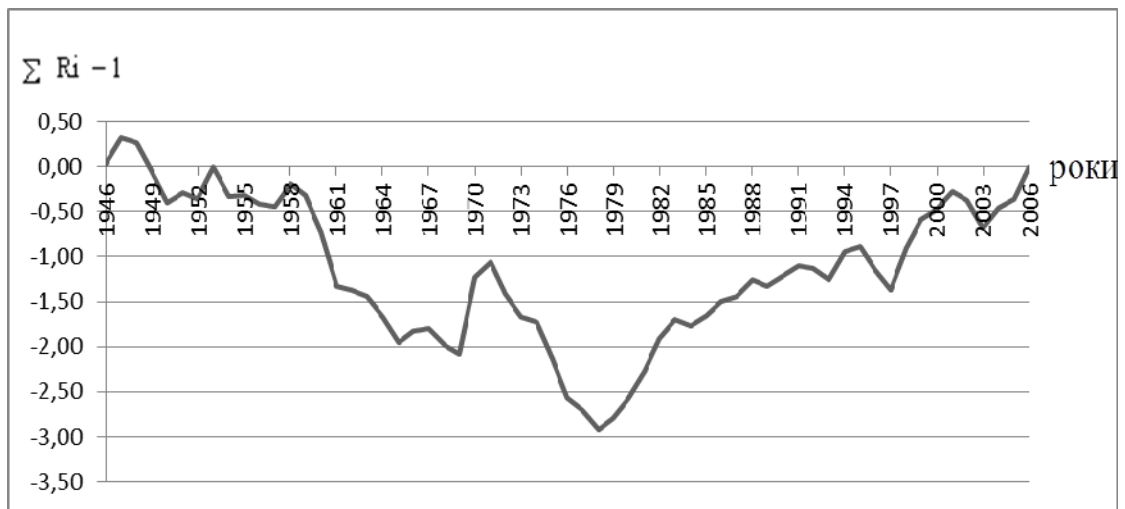


Рис. 2 – Різницева інтегральна крива річного стоку у створі р. Десна – м.Чернігів

У роботі використані такі методи визначення показників якості води: ІЗВ та комплексна оцінка показників екологічної класифікації якості поверхневих вод.

Методика оцінки якості води за комплексним показником - індексом забрудненості води (ІЗВ) - була рекомендована для використання підрозділам Держкомгидромету [9]. Це одна з найпростіших методик комплексної оцінки якості води. Розрахунок ІЗВ проводиться за обмеженим числом інгредієнтів. Визначають середнє арифметичне значення результатів хімічних аналізів по кожному з таких показників – азот амонійний, азот нітритний, нафтопродукти, феноли, розчинений кисень, БСК. Знайдене середнє арифметичне значення кожного з показників порівнюють з відповідними ГДК (ділять їх концентрації на ГДК). Для розчиненого кисню знаходимо співвідношення його ГДК до концентрації. Показник ІЗВ розраховується за такою формулою [9]

$$ІЗВ = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ГДК_i}, \quad (1)$$

де  $C_i$  – середня концентрація одного з шести показників якості води;

$ГДК_i$  – гранично допустима концентрація кожного з показників якості води.

За величинами розрахованих ІЗВ виконується оцінка якості води. При цьому виділяють такі класи якості води: I – дуже чиста (ІЗВ  $\leq 0,3$ ); II – чиста (ІЗВ 0,3-1); III – помірно забруднена (ІЗВ 1-2,5); IV – забруднена (ІЗВ 2,5-4); V – брудна (ІЗВ 4-6); VI – дуже брудна (ІЗВ 6-10); VII надзвичайно брудна (ІЗВ  $> 10$ ) [9].

Перший клас – води, на які найменше впливає антропогенне навантаження. Величини їх гідрохімічних та гідробіологічних показників близькі до природних значень для даного регіону.

Другий клас – води з певними змінами щодо природного стану, однак зміни поки що не порушили екологічної рівноваги.

Третій клас – води зі значним антропогенним впливом, рівень якого близький до межі стійкості екосистем.

Води вищих класів – це води з порушеними екологічними параметрами, їх екологічний стан оцінюється як екологічний регрес [9].

За індексом ІЗВ, розрахованим по трьох гідрологічних постах, розташованих вище міста Новгород-Сіверський, міста Чернігів та села Літки за період 1989-2007 рр., виявлено, що води річки Десна за цей період були переважно I-II класу якості: “чисті” та “дуже чисті”. Осереднена за багаторічний період величина ІЗВ зростає за довжиною річки від 0,56 до 0,73 (рис.3). В той же час води річки Десна за осередненим показником відносяться на всіх трьох постах до 2 класу якості, тобто “чисті”.

Комплекс показників екологічної класифікації якості поверхневих вод включає загальні і специфічні показники. Загальні показники, до яких належать показники соляового складу і трофо-сапробності вод (еколого-санітарні), характеризують властивості інгредієнтів, концентрація яких може змінюватись під впливом господарської діяльності. Специфічні показники характеризують вміст забруднюючих речовин токсичної й радіаційної дії [10].

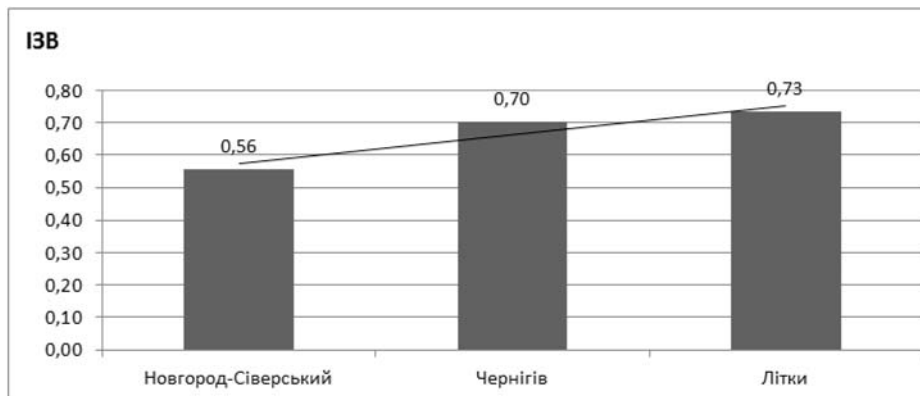


Рис. 3 – Динаміка величини ІЗВ за довжиною р. Десна

Система екологічної класифікації якості поверхневих вод суші та естуаріїв України включає три групи спеціалізованих класифікацій, а саме:

- група класифікацій за критеріями соляового складу;
- класифікація за трофо-сапробіологічними критеріями;
- група класифікацій за критеріями вмісту специфічних речовин токсичної та радіаційної дії, а також за рівнем токсичності.

Результати оцінки подаються у вигляді єдиної екологічної оцінки, яка ґрунтується на заключних висновках по трьох блоках [10].

Етап узагальнення оцінок якості води за окремими показниками з визначенням інтегральних значень класів і категорій якості води виконується лише на основі аналізу показників в межах відповідних блоків. Це узагальнення полягає у визначенні середніх і найгірших значень для трьох блокових індексів якості води, а саме: для індексу забруднення компонентами соляового складу ( $I_1$ ), для трофо-сапробіологічного (еколого-санітарного) індексу ( $I_2$ ), для індексу специфічних показників токсичної і радіаційної дії ( $I_3$ ). Середні значення для трьох блокових індексів якості води визначаються шляхом обчислення середнього номера категорії за всіма показниками даного блоку: при цьому категорія 1 має номер 1 категорія 2 – номер 2 і т.д. Середні значення блокових індексів можуть бути дробовими числами. Найгірші значення для трьох блокових індексів якості води визначаються за відносно найгіршим показником (з найбільшим номером категорії) серед всіх показників даного блоку[10].

Етап визначення об'єднаної оцінки якості води для певного водного об'єкта в цілому або для окремих його ділянок полягає в обчисленні інтегрального, або екологічного індексу ( $I_E$ ). Використання екологічного індексу якості води доцільно в тих випадках, коли зручніше користуватися однозначною оцінкою: для планування водоохоронної діяльності, опрацювання водоохоронних заходів, здійснення екологічного і еколого-економічного

районування, екологічного картографування тощо. Значення екологічного індексу якості води визначається за такою формулою [10]

$$I_E = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}, \quad (2)$$

де  $I_1$  – індекс забруднення компонентами сольового складу;  $I_2$  – трофо-сапробіологічний (еколого-санітарний) індекс;  $I_3$  – індекс забруднення специфічними показниками токсичної і радіаційної дії.

Екологічний індекс якості води обчислюється для середніх ( $I_{E-сер}$ ) і для найгірших ( $I_{E-макс}$ ) значень категорій окремо та може бути дробовим числом [10].

Екологічна оцінка є неодмінною умовою екологічного нормування якості поверхневих вод, його попереднім етапом. Тому при виконанні екологічної оцінки треба передбачати зіставлення одержаних результатів із значеннями екологічних нормативів, встановленими для даного водного об'єкта. Це необхідно для аналізу відповідності (чи невідповідності) якості вод значенням показників, які встановлені в результаті екологічного нормування якості вод для визначеного водного об'єкта. Результати екологічної оцінки якості поверхневих вод суші та естуаріїв подаються у вигляді таблиць, графіків і карт. В таблицях послідовно розміщують значення показників та відповідні їм класи і категорії якості води [10].

Фактичні концентрації хімічних речовин усереднювалися по роках й для кожного року обиралися максимальні та мінімальні значення по кожному показнику.

**Блок мінеральних показників.** Установлено, що середня річна мінералізація зростає за довжиною річки від 329 до 373 мг/дм<sup>3</sup>. За показником мінералізації на всіх постах води р. Десна є прісними гіпогалінними. За станом та чистотою води: “відмінні” та “дуже чисті”. За блоковим індексом сольового складу вниз за течією стан річки Десна у деякі роки суттєво погіршується, а в інші роки залишається без змін. Основний вплив на якість води річки Десна чинить вміст хлорид-іонів, який погіршує воду у деякі роки до третього класу якості. За рахунок незначного вмісту сульфат-іонів, усереднений блоковий індекс сольового складу зумовлює формування вод першого та другого класу якості води. Отже за блоковим індексом сольового складу води річки Десна є “відмінні” та “дуже добрі”, за чистотою – “чисті” та “дуже чисті”.

**Блок трофо-сапробіологічних показників.** Основним джерелом надходження сполук азоту у природні води є скиди житлово-комунальних та промислових підприємств і поверхневий стік із поверхні водозбору. Особливо велику роль відіграє злив добрив з сільськогосподарський угідь. Азот у природних водах представлений амонійним, нітритним та нітратним азотом.

Концентрація сольового амонію, осереднена за багаторічний період по 3-х постах за довжиною річки, майже не змінювалась. На посту м. Новгород-Сіверський та м. Чернігів осереднена за багаторічний період концентрація амонію складала 0,29 мг/дм<sup>3</sup>, а на посту с. Літки - 0,26 мг/дм<sup>3</sup>. Слід відзначити, що в деяких випадках одиничні концентрації перевищували ГДК, але для значень, осереднених по роках, перевищень не виявлено. Підвищений вміст амонію часто спостерігається в місцях скиду стічних вод і свідчить про анаеробні умови формування хімічного складу води.

Середні за багаторічний період концентрації азоту нітритного та нітратного не змінювались за довжиною ріки і перевищень по ГДК зафіксовано не було.

Серед усіх показників слід звернути увагу на значення завислих речовин, які в значній мірі перевищують ГДК. Їх концентрація зростала не тільки за довжиною річки, але й впродовж періоду спостережень.

Концентрація завислих речовин переважно перевищує ГДК, її середнє значення зросло протягом усього періоду спостережень: для 1989 року середня величина за довжиною ріки складала 0,3 мг/дм<sup>3</sup>, а у 2007 році цей показник досяг 15 мг/дм<sup>3</sup>. Збільшення виносу завислих речовин можна пояснити зростанням водності річки: з 1979 року коливання її річного стоку знаходяться у багатоводній фазі.

**Блок токсичних показників.** На трьох розглянутих гідрологічних постах річки Десна спостереження проводились за такими важкими металами, як Cu, Zn, Cr, Mn та Fe. Концентрація цинку, осереднена за весь період спостережень, змінюється за довжиною річки і складає на посту Новгород-Сіверський  $0,045 \text{ мг/дм}^3$ , на посту Чернігів –  $0,019$ , а на посту с. Літки –  $0,067 \text{ мг/дм}^3$ . Вміст міді у воді річки Десна змінюється так само, як і вміст цинку. Найбільші концентрації спостерігаються на постах вище міста Новгород-Сіверський та с. Літки і становлять вони  $0,0086 \text{ мг/дм}^3$ . На посту вище м. Чернігів концентрація міді складає  $0,0036 \text{ мг/дм}^3$ . Вимірювання вмісту марганцю проводилось лише на двох гідрологічних постах – м. Чернігів та с. Літки, для яких концентрації змінювались від  $0,077$  до  $0,023 \text{ мг/дм}^3$  відповідно. Концентрація хрому в водах річки Десна зростає за довжиною від  $0,001$  до  $0,009 \text{ мг/дм}^3$ . І хоча ці концентрації не перевищують ГДК, все ж можна сказати, що Чернігів справляє деяке забруднення хромом природних вод річки Десна. Вміст заліза в воді річки Десна на посту м. Новгород-Сіверський складає  $0,465 \text{ мг/дм}^3$ . Далі вниз за течією, на посту м. Чернігів концентрація дещо зменшується і становить  $0,225 \text{ мг/дм}^3$ , а на посту с. Літки концентрація заліза загального складає  $0,313 \text{ мг/дм}^3$ . Отримані результати дозволили зробити висновок, що вода забруднюється важкими металами на території Росії, надалі відбувається природне очищення, яке порушується у межах м. Чернігів.

В результаті аналізу вихідних даних по нафтопродуктах установлено, що в середньому лише 30% проб дають результат, відмінний від нуля. Тобто у 70% випадків нафтопродуктів у воді річки Десна не було виявлено, але інші 30% проб фіксують значний вміст нафтопродуктів у воді. Причому в 80% випадків цей вміст перевищує ГДК. Осереднена за багаторічний період концентрація нафтопродуктів у воді річки Десна змінюється від  $0,07$  до  $0,12 \text{ мг/дм}^3$  (рис.4). Причому на посту вище м. Чернігів відзначається її незначне зменшення до  $0,05 \text{ мг/дм}^3$ . Така сама тенденція спостерігається і за максимальними значеннями. Найбільша концентрація нафтопродуктів зафіксована на посту с. Літки у 1994 році. Слід зазначити, що на інших постах максимум був зафіксований також у 1994 році.

Концентрація СПАВ, осереднена за багаторічний період, не перевищує ГДК і практично не змінюється за довжиною річки і коливається в межах від  $0,02$  до  $0,05 \text{ мг/дм}^3$ . Але за максимальними значеннями, зафіксованими на трьох гідрологічних постах, просліджується чітка тенденція зростання вмісту СПАВ у водах ріки Десна вниз за течією. Слід зазначити, що максимальні значення також не перевищують ГДК.

Виконано підрахунок повторюваності різних класів якості води за комплексною екологічною оцінкою якості поверхневих вод за відповідними категоріями (табл. 2).

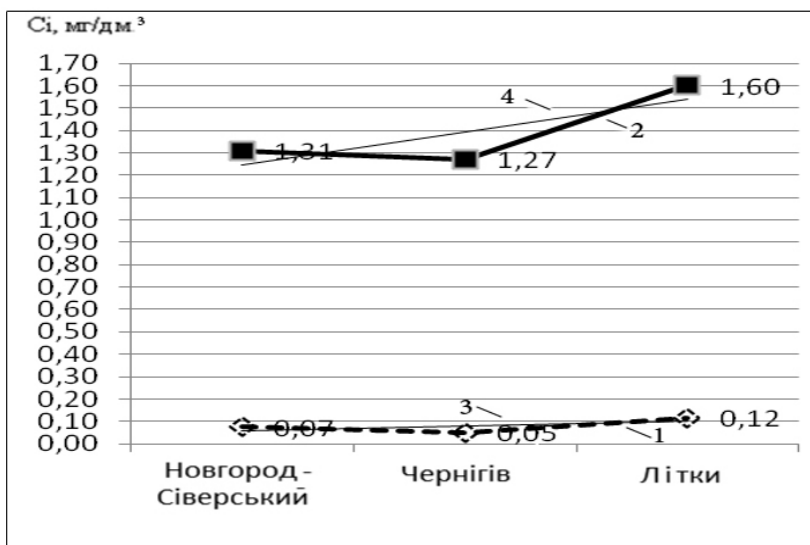


Рис. 4 – Зміна середньої (1) та максимальної (2) багаторічної концентрації нафтопродуктів за довжиною річки Десна, 3 та 4 – лінії тренду.

Таблиця 2 – Повторюваність класів якості води р. Десна

Річка-пост	Клас якості	За станом води	Повторюваність,%
р. Десна- м. Новгород- Сіверський	1	відмінні	10
	2	дуже добрі	16
	3	добрі	47
	4	задовільні	24
р. Десна – м. Чернігів	1	відмінні	0
	2	дуже добрі	23
	3	добрі	77
	4	задовільні	0
р. Десна – с. Літки	1	відмінні	10
	2	дуже добрі	10
	3	добрі	46
	4	задовільні	38

З таблиці видно, що води річки Десна є переважно третього класу якості – добрі. Також слід зауважити, що якість води в річці Десна з наближенням до с. Літки значно погіршується, про що свідчить зростання повторюваності четвертого класу якості води на в/п р. Десна – с. Літки до 38%. Причиною цьому є забруднення від міста Чернігів, оскільки с. Літки знаходиться нижче за течією від міста Чернігів й відображає його вплив на якість води річки Десна.

Аналіз змін якості води у роки різної водності та визначення повторюваності різних класів забруднення (табл.3) показав, що у маловодні роки забруднення річки Десна зростає за довжиною річки: повторюваність “задовільного” стану якості води змінюється від 0 (м. Новгород-Сіверський) до 100% (с. Літки). У створі р Десна – с.Літки у маловодні роки розглядуваного періоду спостерігався лише “задовільний” стан якості води.

У багатоводні роки якість вод покращується й повторюваність “задовільного” стану зменшується до 40% у створах Новгород-Сіверський та Літки (табл.3). Для створу р.Десна – м. Чернігів спостерігався тільки добрий (100%) стан якості води. Аналіз одержаних результатів показав, що забруднення річки Десна у багатоводні роки у створі р. Десна - м. Новгород Сіверський спричиняється такими забруднювальними речовинами, як завислі речовини ( 60 ГДК), нафтопродукти (3 ГДК), феноли (7 ГДК). В той же час у багатоводні роки на в/п Літки головними забруднювальними речовинами були завислі речовини (162 ГДК – 1998 рік), нафтопродукти (13ГДК), феноли (5 ГДК). Отже, основними забруднювальними речовинами води річки Десна у багатоводні роки на всіх водомірних постах були одні й ті самі речовини.

Аналіз якості води річки Десна на посту м. Чернігів показав, що у маловодні роки 100% випадків якості води «задовільна» (табл.3) спричиняються такими забруднювальними речовинами: завислі речовини (356 ГДК ), феноли (7 ГДК), нафтопродукти (2 ГДК). Але у той же час, у маловодні роки з’являється перевищення ГДК по залізу загальному (4 ГДК), яке відсутнє у багатоводні роки. Відповідно до одержаних результатів можна зробити висновок, що у багатоводні роки стан води покращується, але як у верхній, так і в нижній течії можливі окремі випадки забруднення.

**Висновки.** У порівнянні із 1988-1995 рр. за екологічним індексом стан вод річки Десна покращився від “задовільного” (м. Новгород-Сіверський) та “поганого” (нижче м.Чернігів) до “доброго” та “задовільного”, відповідно. У маловодні роки якість води суттєво погіршується до “задовільного” стану навіть вище м. Чернігів. Основними забруднюючими речовинами, концентрація яких перевищує ГДК господарсько-побутового і культурно-побутового

водопостачання, є завислі речовини, нафтопродукти, феноли, у маловодні роки до них додається залізо. Важкі метали надходять з території Росії. Після кордону із Росією до м. Чернігів якість води покращується, нижче створу Чернігів – погіршується через стічні води. Забруднення фенолами, нафтопродуктами відбувається, головним чином, вже на території України. Рекомендується приділити увагу очищенню стічних вод м. Чернігова.

Таблиця 3 – Повторюваність класів якості води р. Десна за роками різної водності

Річка- пост	Роки за водністю	Клас якості	За станом води	Повторюваність, %
р. Десна - м.Новгород-Сіверський	Маловодні	1	відмінні	50
		2	дуже добрі	0
		3	добрі	50
		4	задовільні	0
	Середньої водності	1	відмінні	0
		2	дуже добрі	20
		3	добрі	60
		4	задовільні	20
	багатоводні	1	відмінні	0
		2	дуже добрі	20
		3	добрі	40
		4	задовільні	40
р. Десна - м.Чернігів	маловодні	1	відмінні	0
		2	дуже добрі	0
		3	добрі	100
		4	задовільні	0
	середньої водності	1	відмінні	0
		2	дуже добрі	50
		3	добрі	50
		4	задовільні	0
	багатоводні	1	відмінні	0
		2	дуже добрі	0
		3	добрі	100
		4	задовільні	0
р. Десна - с.Літки	маловодні	1	відмінні	0
		2	дуже добрі	0
		3	добрі	0
		4	задовільні	100
	середньої водності	1	відмінні	0
		2	дуже добрі	0
		3	добрі	80
		4	задовільні	20
	багатоводні	1	відмінні	20
		2	дуже добрі	20
		3	добрі	20
		4	задовільні	40

### Список літератури

1. Вишневецький В.І., Косовець О.О. Гідрологічні характеристики річок України. – К.: Ніка-Центр. – 2003.-324 с.
2. *Ресурсы поверхностных вод СССР*: – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – Т. 6, вып. 3: Украина и Молдавия. – 491 с.
3. Хільчевський В.К., Ободовський О.Г., Гребінь В.В. та ін. Загальна гідрологія. – К.:Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2008. –399с.
4. *Осадчий В.И., Самойленко В.Н., Набиванец Ю.Б.* Информационный менеджмент экологического оздоровления международного бассейна Днепра. – К.:Ника-Центр, 2004. -152 с.
5. *Социально-экономическая оценка* влияния трансграничного загрязнения на население бассейна р.Днепр и определение основных субъектов инфраструктуры региона / Б.Данилишин // Отчет по программе ПРООН-ГЭФ, 2002. – 248с.
6. *Коротун І. М., Коротун Л.К., Коротун С.І.* Природні ресурси України: Навчальний посібник. – Рівне, 2000. - 192 с.
7. *Вишневецький В.І.* Річки і водойми України. Стан і використання. – Київ: Віпол, 2000. - 375с.
8. *Гриб Й.В., Клименко М.О., Сондак В.В.* Відновна гідроекологія порушених річкових та озерних систем (гідрохімія, гідробіологія, гідрологія, управління). – Навчальний посібник. – Т.2. – Волинські береги. – 347 с.
9. *Сніжко С.І.* Оцінка та прогнозування якості природних вод. – К.: Ника-центр, 2001. – 258 с.
10. *В.Д.Романенко* та ін. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. – К.: Символ-Т, 1998. – 28с.

#### **Оценка качества воды реки Десна по комплексу гидрохимических показателей. Лобода Н.С., Даус М.Е., Дичеренко Ю.Л.**

*В статье представлены результаты оценки качества воды реки Десна за многолетний период и в годы характерной водности на основании расчетов индекса загрязненности воды (ИЗВ) и экологической оценки качества поверхностных вод за соответствующими категориями, определения пригодности использования воды для хозяйственно-питьевого использования.*

**Ключевые слова:** *качество воды, индекс загрязненности воды (ИЗВ), экологическая оценка, годы характерной водности.*

#### **Assessment of water quality of the river Desna with respect to the complex of hydro-chemical indicators. Loboda N.S., Daus M.E., Dicherenko Y.L.**

*The paper presents the results of the assessment of water quality of the river Desna over a period of years and the years of typical water content based on calculations of water pollution index (WPI) and the environmental assessment of the quality of surface waters according to the relevant categories, determination of the suitability of water using for domestic water use.*

**Keywords:** *water quality, water pollution index (WPI), environmental assessment, years of typical water content.*

УДК 556.531.4

Є.Д. Гопченко, д.г.н., Катинська І.В.

Одеський державний екологічний університет

## НОРМИ РІЧНОГО СТОКУ НА ТЕРИТОРІЇ ЗАКАРПАТТЯ

*В статті узагальнюються норми річного стоку на території Закарпаття.*

**Ключові слова:** норма стоку, річкові водозбори, однорідність часових рядів.

**Вступ.** Норма стоку відноситься до фундаментальних характеристик водних ресурсів тієї чи іншої території. У межах рівнинної Європейської території вона підпорядкована широтній закономірності, яка порушується значною мірою наявністю на водозборах залісеності, заболоченості, карсту, водойм руслового типу (озер, водосховищ, ставків). Зональність у просторовому розподілі норм річного стоку зумовлюється комплексом кліматичних факторів (опадями, температурами повітря, випаровуванням з поверхні водозборів і водойм й ін.)

Більш складними виявляються умови формування стоку у гірських районах, до яких відноситься й Закарпаття. Широтна закономірність тут змінюється висотною поясністю і це стосується не лише опадів і температур повітря (як головних чинників водоутворення), але й характеристик ґрунтово-рослинного покриву річкових водозборів.

Досліджувана територія знаходиться у лісостеповій і степовій зонах Карпатських гірських утворень. Найбільшою річкою Закарпаття є р. Тиса, переважно права частина басейну, яка утворюється злиттям р. Чорна Тиса і р. Біла Тиса з витоком на висоті 1400 м над рівнем моря [1]. По території України р. Тиса протікає головним чином в західному напрямку, частково по кордону з Угорщиною та Румунією.

Найбільша кількість опадів випадає у східній частині території (більш ніж 1500 мм в рік у верхів'ях річок Тересва і Теребля). З просуванням до низини їх величина зменшується до 700-800 мм. В цілому більш зволеними є західні схили.

**Вивченість річного стоку у Закарпатті.** Мережа гідрологічних постів, на яких здійснюються систематичні дослідження режиму річок у Закарпатті, у часі не була постійною. Ще у 1975 році в межах Закарпатської області було більше 70 гідрологічних постів, з них залишились лише головні, а інші – закриті. Важливо відзначити, що з 1975 року працює й водно-балансова станція, до складу якої входить 19 водозборів з площами від 0,28 км<sup>2</sup> (стр. Глибокий Яр – смт Міжгір'я) до 550 км<sup>2</sup> (р. Ріка – смт Міжгір'я). Наявність водно-балансової станції суттєво покращує можливості встановлення закономірностей формування річного стоку на невеликих водозборах, оскільки зазвичай стаціонарні спостереження організуються, як правило, на середніх і великих за розмірами річках.

Найбільш ґрунтовні дослідження річного стоку у Закарпатті відносяться до 1965 року. Їх результати опубліковані в [1]. Але вони відрізняються досить суттєвими протиріччями. З одного боку, норми стоку були картовані, що передбачає географічну закономірність у розподілі цих величин за територією. Ізолінії проведені через 10 л/(с.км<sup>2</sup>) і змінюються від 10 до 30 л/(с.км<sup>2</sup>). З іншого боку, у тій же самій довідковій монографії надається районування території за залежностями норм стоку від висотного положення водозборів (всього виділено 3 райони). Вважаємо, що такий науково-методичний підхід щодо просторового узагальнення стокових характеристик не досить коректний, бо районування і географічна зональність є альтернативними варіантами просторових узагальнень. У нормативному документі СНіП 2.01.14-83 [2] передбачається середнє багаторічне значення річного стоку гірських річок



встановлювати за регіональними залежностями модулів стоку  $\bar{q}$  від середньої висоти водозборів  $H_e$ . Координати цієї залежності для Закарпаття наводяться у табл. 1

Таблиця 1 – Координати залежності  $\bar{q} = f(H_e)$

$H_e, \text{м}$	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
$\bar{q}, \text{л/(с.км}^2\text{)}$	5,1	8,7	12,3	15,9	19,4	23,0	26,6	30,2	33,7	40,8

Враховуючи, що у СНіП 2.01.14-83 узагальнені матеріали спостереження лише до 1975 року, вельми актуальним є уточнення норм річного стоку на сучасних даних мережі гідрологічних постів.

**Вихідні матеріали по річному стоку.** Вони охоплюють період з початку спостережень і по 2008 рік, включно. Часові ряди по 34 річкових водозборах становлять від 12 (р. Брустуранка – с. Лопухів) до 55 років (р. Латориця – м. Мукачеве), діапазон водозбірних площ – від 0,28 (стр. Глибокий Яр – смт Міжгір'я) до 9140 км<sup>2</sup> (р. Тиса – смт Вілок), а висот – від 300 (р. Стара – с. Зняцєве) до 1200 м (р. Біла Тиса – м. Луги). Середня квадратична похибка при обчисленні багатолітніх норм річного стоку знаходиться на рівні 4,6 %.

**Визначення норм річного стоку у Закарпатті.** Приступаючи до визначення норм річного стоку, необхідно переконатись у стаціонарності часових рядів і їх репрезентативності з точки зору наявності багатоводних і маловодних періодів. Ці обставини є досить актуальними, оскільки на думку спеціалістів-кліматологів в останні десятиліття спостерігаються направлені коливання глобального клімату, що може відповідним чином відобразитись і на характеристиках водних ресурсів, зокрема, у Закарпатті.

Для з'ясування поставлених питань по всіх гідрологічних постах були побудовані хронологічні графіки модулів річного стоку, згладжені за допомогою лінійного фільтра з періодом осереднення  $T = 3$  роки. На їх основі встановлені розрахункові тривалості для обчислення норм річного стоку, які враховували однакову кількість багатоводних і маловодних фаз. Результати наведені у табл. 2. Оскільки циклічність в рядах стокових величин розрізняється тривалістю і глибиною окремих фаз водності, середні багаторічні значення річного стоку були також обчислені і на основі аналізу різницевого

інтегральних кривих модульних коефіцієнтів  $\sum_{i=1}^n (k_i - 1) = f(t)$ . Визначені по повних

циклах коливань водності середні значення модулів  $\bar{q}$  також наведені у табл. 2. Для порівняння середніх арифметичних за період спостережень величин  $\bar{q}$ , з одного боку, а розрахованих норм річного стоку (встановлених за допомогою хронологічних графіків і різницевого інтегральних кривих), з іншого, побудовані відповідні залежності вигляду

$$\bar{q} = k \bar{q}_i, \quad (1)$$

де  $\bar{q}$  – норма річного стоку, розрахована з використанням методики різницевого інтегральних кривих;

$k$  – коефіцієнт регресії;

$\bar{q}_i$  – середні багаторічні величини стоку, розраховані без аналізу циклічності  $\bar{q}_1$  і при встановленні циклічності по хронологічних графіках модулів річного стоку  $\bar{q}_2$ .

Таблиця 2 – Норми річного стоку, обчислені різними методами

№ пп	Ріка-пост	$F$ , км <sup>2</sup>	$H_B$ , м	Середній багаторічний модуль стоку, л/(с км <sup>2</sup> )		
				середнє арифм.	за інтегр. різниці. крив.	за згладж. граф. стоку
1	3	4	5	6	7	8
1	р. Боржава – с. Довге	408	620	27,99	28,53	28,75
2	р. Боржава – с. Шаланки	1100	470	19,10	19,43	19,13
3	р. Брустуранка – с. Лопухів	257	1100	37,16	37,94	39,81
4	р. Веча – с. Неліпино	241	760	28,84	28,84	29,59
5	стр. Гл. Яр – сmt Міжгір'я	0,28	550	8,89	8,89	9,29
6	стр. Йойковець – сmt Міжгір'я	0,39	630	17,69	17,69	18,90
7	р. Косовська – с. Косовська Поляна	122	1060	39,84	40,08	39,43
8	р.Латориця – м. Мукачеве	1360	570	19,45	19,45	19,61
9	р. Латориця – с. Підполоззя	324	720	30,46	30,77	29,94
10	р. Латориця – м. Свалява	680	700	21,87	21,87	21,99
11	р. Латориця – м. Чоп	2870	310	13,03	13,03	13,09
12	р. Лопушна – с. Лопушне	37,3	897	26,27	26,27	28,15
13	р. Лужанка – с. Нересниця.	149	770	31,88	32,01	32,42
14	р. Люта – с. Черногорова	169	700	25,98	26,27	26,39
15	р. Мокранка – с. Руська Мокра	214	1100	38,93	39,21	40,47
16	р. Пилипець – с. Пилипець	44,2	820	34,16	34,16	34,62
17	р. Репінка – с. Репіно	203	780	30,54	30,54	28,42
18	р.Ріка – сmt Міжгір'я	550	800	25,16	25,25	25,16
19	р. Ріка – м. Хуст	1130	680	41,98	41,50	39,75
20	р. Стара – с. Зняцеве	224	300	10,63	10,71	10,85
21	р. Теремля – с. Колочава	369	1000	40,00	40,00	39,21
22	р. Тересва – сmt Дубове	757	1000	34,48	34,48	38,28
23	р. Тересва – с. Нересниця	1100	930	32,31	32,31	34,65
24	р. Тересва – сmt Усть-Чорна	572	1100	34,07	34,07	36,08

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
25	р. Тиса – смт Вілок	9140	–	23,02	23,29	23,70
26	р. Біла Тиса – м. Луги	189	1200	27,20	27,20	27,51
27	р. Тиса – м. Рахів	1070	1100	24,22	24,59	24,27
28	р. Тиса – м. Тячів	6470	–	21,70	21,92	21,57
29	р. Тиса – м. Хуст	7690	870	21,88	22,10	22,06
31	р. Тур'я – с. Сімер	464	540	19,53	19,53	19,50
32	р. Уж – с. Жорнава	286	670	23,39	23,29	23,43
33	р. Уж – с. Зарічеве	1280	560	16,77	16,53	16,45
34	р. Уж – м. Ужгород	1970	530	14,66	14,83	14,73

Виявилося, що коефіцієнти регресії в обох випадках майже дорівнюють одиниці при коефіцієнті кореляції часткових залежностей  $r \approx 1,0$ .

Викладене свідчить про те, що в умовах Закарпаття норми стоку по рядах спостережень до 2008 року можуть обчислюватись без урахування характеру багаторічних коливань.



Рис. 1 – Тренди коливання водності

Для більш повної оцінки особливостей багаторічних коливань стоку часові ряди були досліджені на однорідність і на наявність трендів коливань водності. Однорідність рядів перевірялась за допомогою критеріїв Ст'юдента і Фішера [3]. По всіх рядах стаціонарність не порушена. Про це свідчить і відсутність значущих трендів коливання

водності. На рис. 1 показані позначки трендів («+» – додатний напрям, «-» – від’ємний напрям, «0» – практична відсутність тренда), які не утворюють якоїсь просторової закономірності часової змінності річного стоку на території Закарпаття.

**Просторове узагальнення норм річного стоку.** Раніше йшлося про те, що на рівнинних територіях мають місце широтні закономірності, тоді як в гірських районах – висотна поясність. Крім того, слід взяти до уваги, що і в тому, і в іншому випадках на стокові величини можуть впливати місцеві фактори: залісенність, заболоченість, карстові явища.

Враховуючи гірські умови регіону, на першому етапі була побудована залежність норм стоку  $\bar{q}$  від висотного положення водозборів  $H_g$ . Використані дані по 34 річкових водозборах (табл. 2) з площами від 0,28 км<sup>2</sup> до 9140 км<sup>2</sup> і висотами від 300 м до 1200 м. Як видно з рис. 2, незважаючи на суттєвий розкид точок, прослідковується тенденція до збільшення модулів річного стоку  $\bar{q}$  залежно від середньої висоти водозборів. Описується вона рівнянням

$$\bar{q} = 0,027(H_g - 1000) + \bar{q}_{1000}, \quad r = 0,72, \quad (2)$$

де  $\bar{q}_{1000}$  – норма річного стоку, приведена до умовної висоти  $H_g = 1000$  м;  
 $r$  – коефіцієнт кореляції.

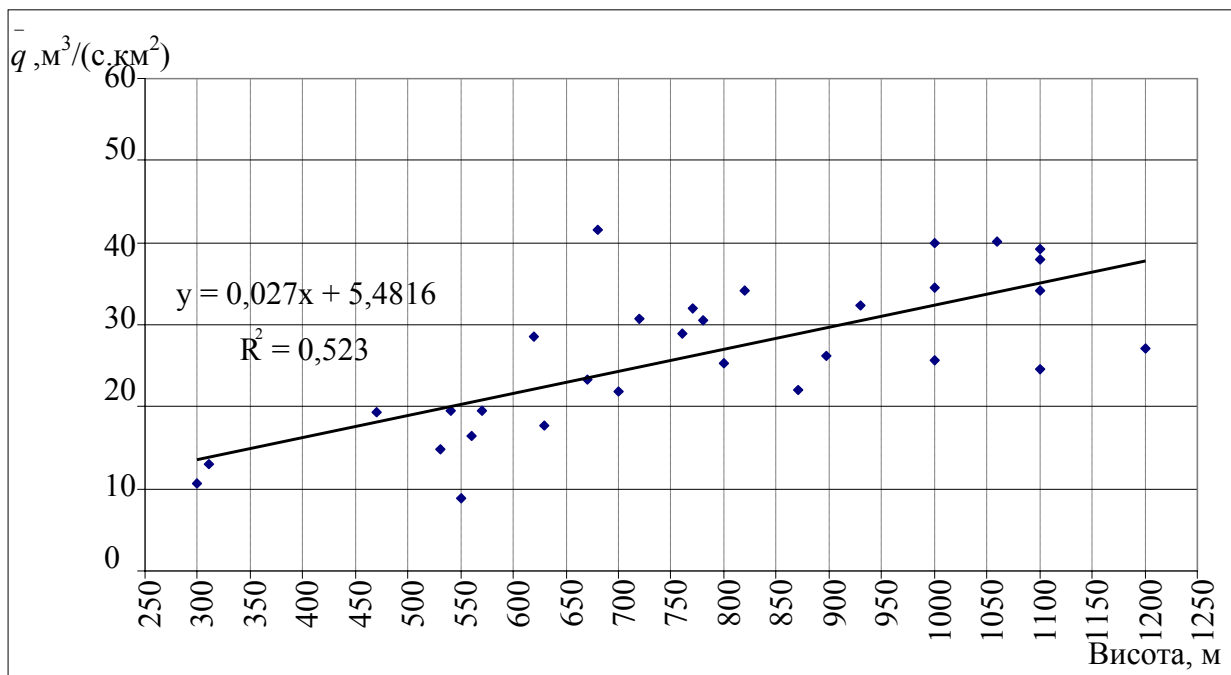


Рис. 2 – Залежність між нормами річного стоку і висотним положенням водозборів

Коефіцієнт кореляції  $r$  є значущим. З (2) можна записати рівняння для коефіцієнта впливу висотного положення водозборів на норму річного стоку у Закарпатті

$$k_{H\Gamma} = 1 + 0,83 \times 10^{-3} (H - 1000). \quad (3)$$

За допомогою (3) усі вихідні дані  $\bar{q}$  (табл. 2) можна привести до умовної висоти водозборів  $H_e = 1000\text{м}$ , тобто

$$\bar{q}_{1000} = \bar{q}/k_H. \quad (4)$$

У подальшому досліджується вплив на  $\bar{q}_{1000}$  географічного положення водозборів. За кількісну характеристику бралась широта геометричних центрів водозборів  $\varphi^\circ$  півн.ш. Залежність свідчить про поступове зменшення  $\bar{q}_{1000}$  при збільшенні  $\varphi^\circ$  півн.ш.

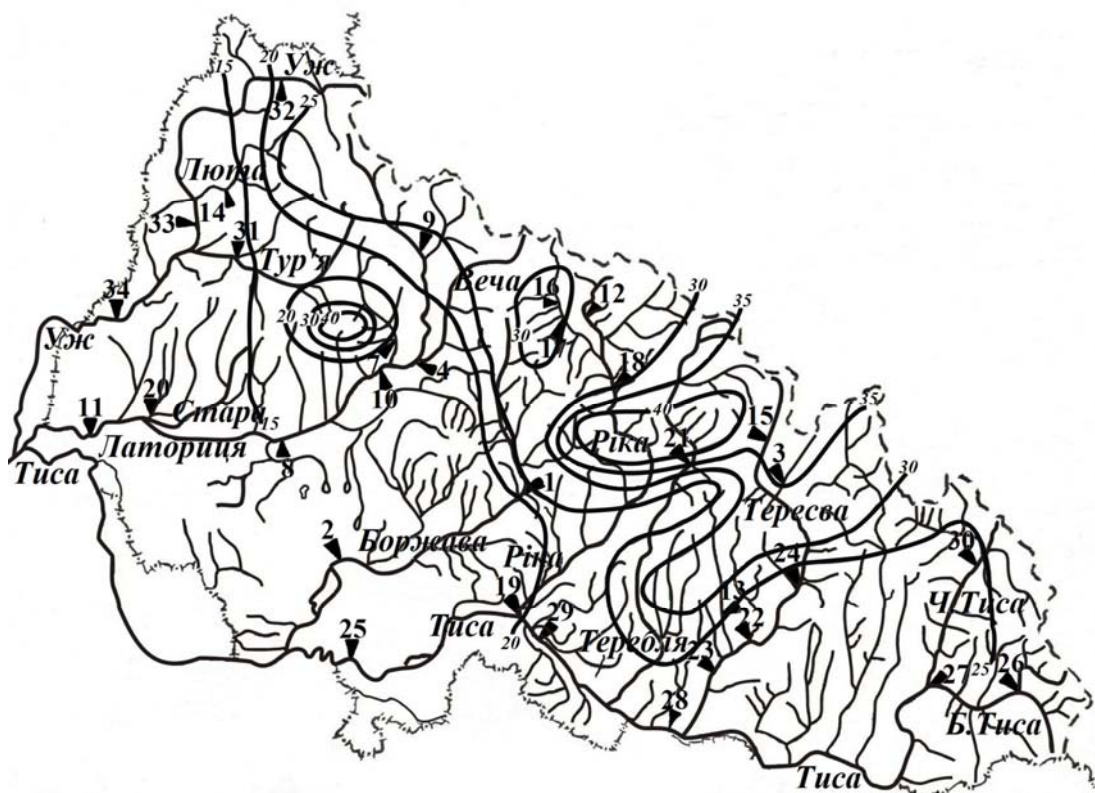


Рис. 3 – Розподіл норми річного стоку на території Закарпаття, л/(с.км<sup>2</sup>).

При побудуванні карти норми стоку (рис. 3) використані дані по водозборах з площами більшими за 20 км<sup>2</sup>. Ізолінії проведені через 5-10 л/(с.км<sup>2</sup>). В цілому норми змінюються від 15 (у північно-західній частині) до 30-40 л/(с.км<sup>2</sup>) – у міжріччі Тур'я – Латориця і Ріка – Тересва. На водозборах з площами  $F < 20 \text{ км}^2$  норми стоку відрізняються від зональних величин (в бік від'ємних значень). Для таких водозборів запропоновані відповідні поправкові коефіцієнти  $k_F$  (табл. 3)

Таблиця 3 – Перехідні коефіцієнти від зонального стоку на невеликих водозборах

$F, \text{ км}^2$	0	2	5	10	15	$\geq 20$
$k_F$	0,43	0,64	0,77	0,88	0,95	1,0

За відсутності спостережень за гідрологічним режимом річок або їх недостатності норма стоку визначається за виразом

$$\bar{q} = \bar{q}_{H_B=1000} k_H k_F, \quad (5)$$

де  $\bar{q}_{H_B=1000}$  – значення норми стоку, приведеної до  $H_B = 1000$ , які знімаються з карти для геометричних центрів водозборів;

$k_H$  – коефіцієнт впливу на норму стоку висотного положення водозборів;

$k_F$  – поправковий коефіцієнт на малих водозборах ( $F < 20$  км<sup>2</sup>)

**Висновки.** Аналіз часових рядів річного стоку на території Закарпаття свідчить про їх стаціонарність і однорідність впродовж наявних спостережень (станом на 1 січня 2009 року). Обчислені норми річного стоку змінюються у широких межах – від 8,89 л/(с.км<sup>2</sup>) до 41,5 л/(с.км<sup>2</sup>). Виявлена залежність норм стоку від висотного положення водозборів, а при  $F < 20$  км<sup>2</sup> – і від їх розмірів.

Отримані узагальнення норм річного стоку сприяють уточненню їх розрахунку на території Закарпаття.

### Список літератури

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 6 выпуск 1. Западная Украина и Молдавия. – Л.: Гидрометеоздат, 1969. – 884 С.
2. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 447 С.
3. Рожественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 423 С.

**Нормы годового стока на территории Закарпаття. Гопченко Е.Д., Катинская И.В.**

*В статье обобщаются нормы годового стока на территории Закарпаття.*

**Ключевые слова:** норма стока, речные водосборы, однородность временных рядов.

**Norms of annual flow on territory of Zakarpat'ya. Gopchenko E., Katynska I.**

*In the article the norms of annual flow are summarized on territory of Zakarpat'ya.*

**Keywords:** norm of flow, river catchments, homogeneity of temporal rows.

## СТАТИСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЧАСОВИХ РЯДІВ МАКСИМАЛЬНИХ ВИТРАТ ВОДИ І ШАРІВ СТОКУ ВЕСНЯНОГО ВОДОПІЛЛЯ В БАСЕЙНІ РІЧКИ ДНІСТЕР

*На базі сучасної вихідної інформації з максимального стоку весняного водопілля проаналізовані тенденції у змінах стокових характеристик і розраховані основні статистичні параметри часових рядів максимальних витрат води і шарів стоку в басейні річки Дністер.*

**Ключові слова:** максимальний стік весняного водопілля, однорідність, статистичні параметри.

**Вступ.** Дністер є найбільшою річкою Західної України та Молдови і відноситься до числа річок, які здавна широко використовуються в багатьох сферах господарської діяльності: водному транспорті, водопостачанні, гідроенергетиці, рибному промислу, рекреації. За умовами живлення річки басейну Дністра, відповідно до орографічних і кліматичних особливостей, поділяються на три типи: гірські річки, які характеризуються проходженням паводків протягом всього року; річки височин з високим весняним водопіллям і серією літніх дощових паводків; рівнинні степові річки, що характеризуються високою хвилею весняної повені і невеликим стоком в інші частини року, нерідко річки тут пересихають і перемерзають [2,5].

Отже надійний розрахунок характеристик максимального стоку є актуальною проблемою для регіонів басейну Дністра, які часто страждають від повеней різного походження, зокрема, і весняних водопіль.

**Метою** даного дослідження є статистичний аналіз сучасної вихідної інформації з максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Дністер.

**Матеріали дослідження.** Для характеристики максимального стоку весняного водопілля – шарів стоку та максимальних витрат води на річках басейну р. Дністер використані матеріали режимних видань за багаторічний період спостережень за гідрологічними характеристиками весняного водопілля (від їх початку і по 2010 р. включно).

Тривалість рядів спостережень за стоком води на досліджуваній території в цілому становить від 11 до 100 років. При цьому більшість постів (53,1%) мають ряди спостережень тривалістю від 41 до 80 років, 3 пости (3,1%) - більше 80 років; на 30 постах (30,6%) гідрологічні ряди також досить тривалі і становлять 21 - 40 років (табл.1). Ряди довжиною менше 20 років є лише на 13 постах, що становить 13,3% від загальної кількості. Найбільш тривалий ряд - тривалістю 100 років, існує на р. Дністер - м. Заліщики.

Таблиця 1- Розподіл водозборів за тривалістю спостережень і величиною їх площ

Площа водозбору, км <sup>2</sup>	Кількість гідрологічних постів з періодом спостережень						
	≤20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100	Всього	%
≤100	4	2	3			9	9,2
101 – 1000	7	15	23	16		61	62,2
1001 – 5000	1	9	5	2	1	18	18,4
5001 – 10000	1	1	1	1		4	4,1
10001 – 20000					1	1	1,0
20001 – 50000		2			1	3	3,1
>50000		1		1		2	2,0
Всього	13	30	32	20	3	98	100
%	13,3	30,6	32,7	20,4	3,1	100	

Аналізуючи діапазон площ водозборів річок, на яких ведуться спостереження, можна відзначити, що їх більша частина відноситься до категорії малих - 70 із 98 або 71.4%. На річках, які можна віднести до категорії середніх, функціонує 26 постів. Що стосується постів на великих річках, то на розглянутій території їх тільки два, що становить 2% від їх загальної кількості.

**Методика дослідження.** Стандартна статистична обробка часових рядів стокових характеристик опирається на методи моментів і найбільшої правдоподібності [9]. У першому випадку безпосередньо по наявних рядах розраховуються параметри статистичного розподілу: середнє арифметичне значення  $\bar{x}$ , коефіцієнти варіації  $C_v$  і асиметрії  $C_s$ , у другому -  $\bar{x}$ ,  $C_v$  і співвідношення  $C_s / C_v$ . Метод найбільшої правдоподібності рекомендується для визначення параметрів, коли використовується крива трипараметричного гама-розподілу, а також заслуговує на перевагу при  $C_v > 0,5$ , а метод моментів - при  $C_v \leq 0,5$  [6,7,9].

Враховуючи те, що у нашому розпорядженні у більшості випадків наявними є досить короткі часові ряди, поширене використання знайшли статистичні оцінки вибірових параметрів розподілу. Інша особливість використання статистичних методів полягає в тім, що дуже часто, навіть за коротких часових рядів, вони відзначаються неоднорідністю. Отже передумовою до статистичного аналізу часових рядів характеристик максимального стоку є перевірка їх на однорідність. Для цього можна скористатися критеріями однорідності середніх Ст'юдента та дисперсії Фішера, а також непараметричним критерієм Вілкоксона [6,7,8]. Оцінка однорідності гідрологічних характеристик передбачає використання як гідролого-генетичних, так і статистичних методів аналізу гідрометеорологічної інформації, які відображають по суті одне і теж гідрологічне явище і тому взаємно доповнюють один одного.

**Результати дослідження.** Визначення статистичних параметрів часових рядів проведене на основі 98 рядів спостережень за максимальними витратами і шарами стоку весняного водопілля в басейні річки Дністер.

Аналізуючи отримані результати за оцінкою однорідності, слід зазначити, що характеристики максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Дністер у більшості випадків однорідні у часі. Перевірка на однорідність проводилася для рядів, які мають спостереження тривалістю більше 20 років. Так, ряди максимальних витрат води весняного водопілля однорідні в 65 випадках з 85 за трьома критеріями, тобто 76.5% рядів є однорідними. Якщо розглядати кожен критерій окремо, то за критерієм Фішера однорідний 51 ряд, за критерієм Ст'юдента – 71, за критерієм Вілкоксона – 61 ряд максимальних витрат води. Подібна ситуація спостерігається і для рядів шарів стоку весняного водопілля - вони однорідні в 79 випадках з 84 за трьома критеріями (94%). За критерієм Фішера однорідні 76 рядів, за критерієм Ст'юдента – 77, за критерієм Вілкоксона – 74 ряди шарів стоку весняного водопілля.

Отже в цілому по території інформацію з максимального стоку весняного водопілля можна вважати однорідною, але для тих рядів, де виявлена неоднорідність, представляє інтерес дослідити наявність у них трендів, тобто направлених змін в бік зменшення або збільшення. Досить корисним є також аналіз циклічності у рядах максимальних шарів стоку і витрат води. З цією метою будуються хронологічні графіки зв'язку  $Y_m = f(t)$  і  $Q_m = f(t)$ , за допомогою яких можна виявити характер і тенденції у багаторічних коливаннях шарів стоку і витрат води.

Такі графіки були побудовані для всіх досліджуваних рядів в басейні р. Дністер, приклади показані на рис.1-3, для них визначені рівняння лінійних трендів та оцінена їх значущість (табл.2-3). Територіальний розподіл постів, дані яких виявилися неоднорідними, добре ілюструє рис.4. Як видно з цього рисунка, практично всі пости розташовані на лівобережній частині басейну Дністра, яку також називають Середньо-Подільською.



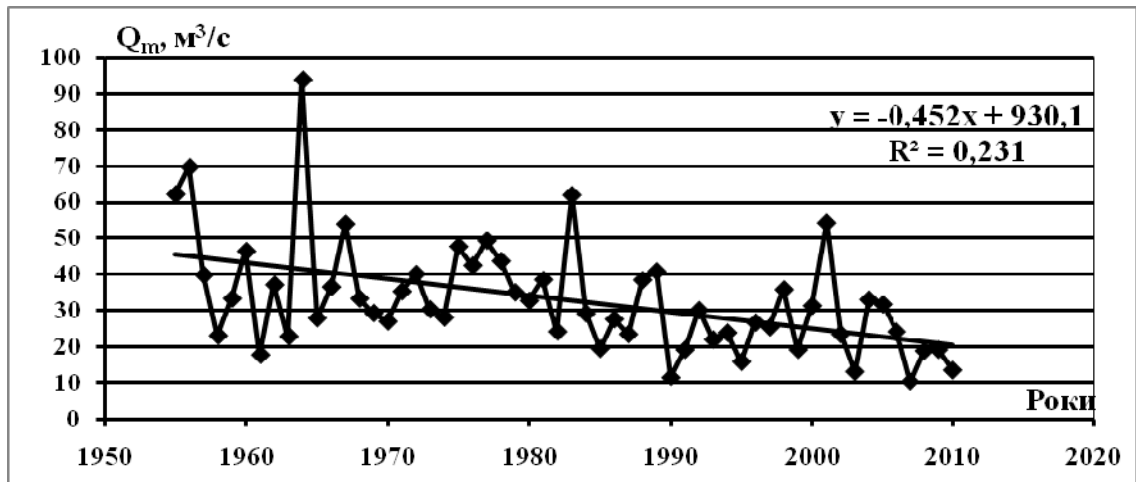


Рис.1 - Хронологічний хід максимальних витрат води весняного водопілля, р.Стрий – с. Матків (права притока р. Дністер).

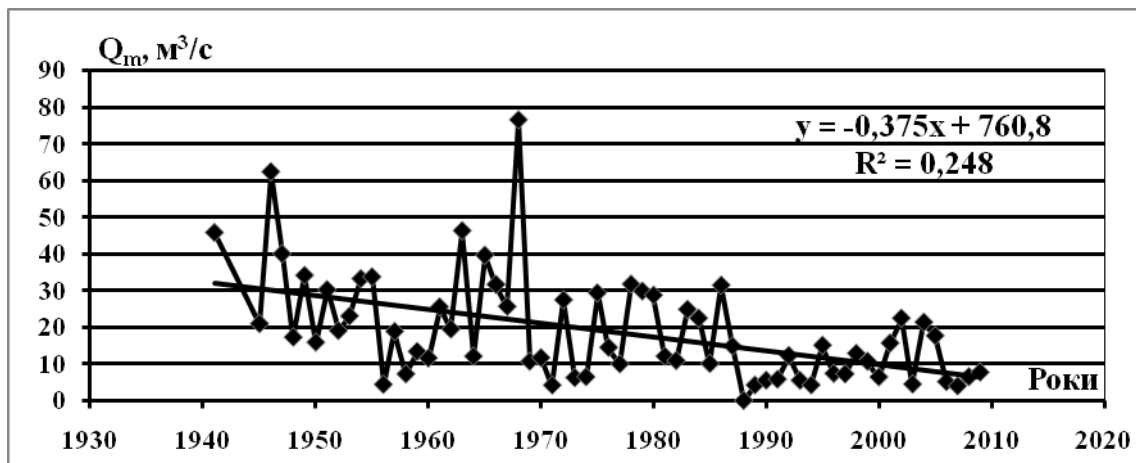


Рис.2 - Хронологічний хід максимальних витрат води весняного водопілля, р.Золота Липа - м. Березжани (ліва притока р. Дністер).

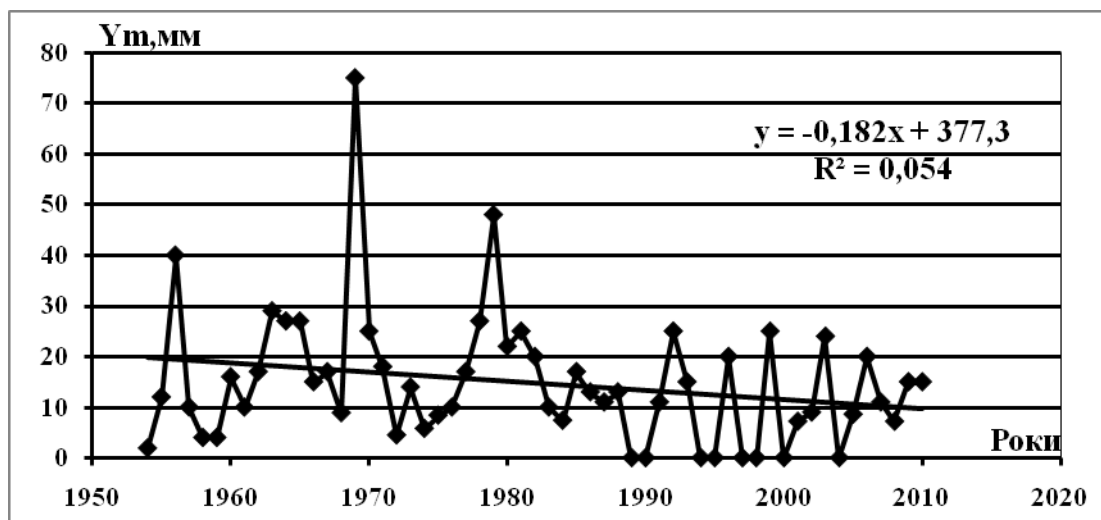


Рис.3 - Хронологічний хід максимальних шарів стоку весняного водопілля, р.Мукша - с. Мала Слобідка (ліва притока р. Дністер).

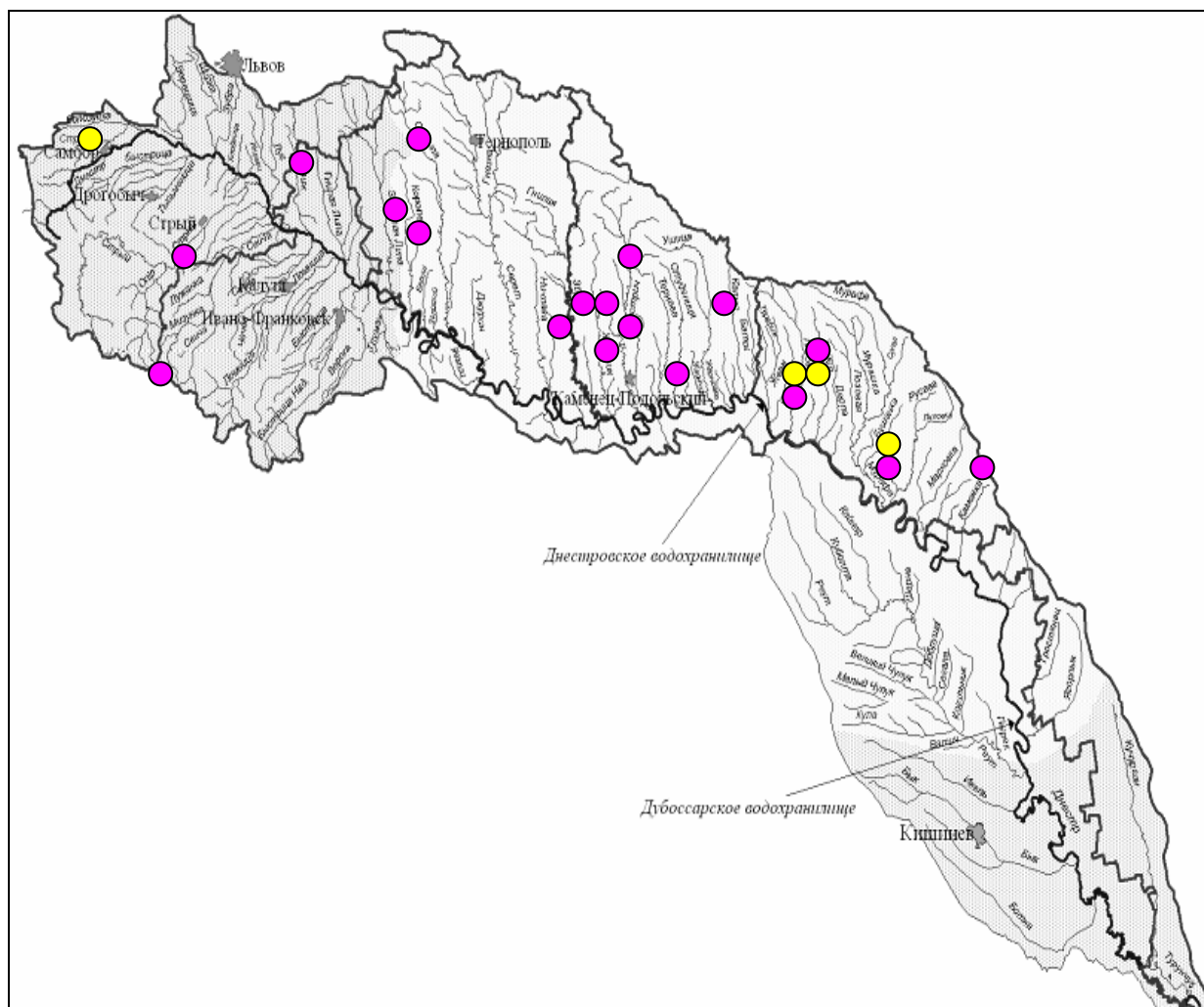


Рис.4 - Картошкама басейну р. Дністер: ●- пости, дані по яких неоднорідні по витратах води весняного водопілля; ● - пости, дані по яких неоднорідні по шарах стоку весняного водопілля .

Як відомо, коефіцієнт кореляції вважається значущим, якщо виконується умова  $r > 2\sigma_r$ , де  $\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}}$  - середня квадратична похибка розрахунку коефіцієнта кореляції,  $n$  - число років спостережень [7,8].

З табл.2 видно, що всі часові ряди, які були досліджені, мають значущі від'ємні тренди. Такий же висновок можна зробити і для часових рядів шарів стоку, окрім одного пункту – р. Мукша – с. Мала Слобідка (табл.3).

Таблиця 2 – Оцінка значущості лінійних трендів в часових рядах максимальних витрат води весняного водопілля в басейні р. Дністер

№ п/п	Річка	Пост	Рівняння за графіком	r	2σ <sub>r</sub>	r/2σ <sub>r</sub>	Значу - щість тренда
1	Стрий	Матків	$y = -0,452x + 930,1$	0,48	0,21	2,29	так
2	Славська	Славське	$y = -0,337x + 687,4$	0,45	0,21	2,14	так
3	Свіж	Букачівці	$y = -0,202x + 416,6$	0,35	0,24	1,46	так

Продовження табл.2

4	Золота Липа	Бережани	$y = -0,375x + 760,8$	0,50	0,18	2,78	так
5	Коропець	Підгайці	$y = -0,189x + 384,2$	0,43	0,20	2,15	так
6	Стрипа	Каплинці	$y = -0,561x + 1134$	0,39	0,21	1,81	так
7	Нічлава	Стрільківці	$y = -0,198x + 404,2$	0,29	0,24	1,21	так
8	Збруч	Волочинськ	$y = -0,490x + 995,5$	0,32	0,24	1,33	так
9	Жванчик	Кугаївці	$y = -0,172x + 348,6$	0,40	0,20	2,00	так
10	Жванчик	Ластівці	$y = -0,249x + 507,6$	0,26	0,24	1,08	так
11	Смотрич	Купин	$y = -0,828x + 1673$	0,41	0,20	2,05	так
12	Смотрич	Цибулівка	$y = -1,248x + 2518$	0,40	0,19	2,11	так
13	Мукша	Мала Слобідка	$y = -0,231x + 464,2$	0,45	0,21	2,14	так
14	Ушиця	Зіньків	$y = -0,994x + 2020$	0,26	0,22	1,18	так
15	Калюс	Нова Ушиця	$y = -0,445x + 898,2$	0,33	0,23	1,43	так
16	Лядова	Жеребилівка	$y = -0,553x + 1113$	0,46	0,23	2,00	так
17	Мурафа	Кудіївці	$y = -0,250x + 502,0$	0,51	0,22	2,32	так
18	Марківка	Підлісівська	$y = -0,644x + 1294$	0,29	0,24	1,21	так

Таблиця 3 – Оцінка значущості лінійних трендів в часових рядах шарів стоку весняного водопілля в басейні р. Дністер

№ п/п	Річка	Пост	Рівняння за графіком	r	2σ <sub>r</sub>	r/2σ <sub>r</sub>	Значущість тренда
1	Стрв'яз	Хирів	$y = -1,170x + 2415$	0,41	0,21	1,95	так
2	Мукша	Мала Слобідка	$y = -0,182x + 377,3$	0,22	0,25	0,88	ні
3	Калюс	Нова Ушиця	$y = -0,354x + 721,2$	0,33	0,23	1,43	так
4	Лядова	Жеребилівка	$y = -0,506x + 1023$	0,44	0,24	1,83	так
5	Мурафа	Кудіївці	$y = -1,450x + 2913$	0,51	0,25	2,04	так

Причинами наявності цих спадних трендів можуть бути кліматичні зміни, антропогенний вплив, а також циклічність у ході річкового стоку. Стосовно до кліматичних змін, що відбулися впродовж останніх десятиліть на території України, то як відзначається сучасними дослідниками - як кліматологами [4], так і гідрологами [1,2,3], їх вплив на складові водно-теплогового балансу зумовили певний перерозподіл внутрішньорічного розподілу стоку річок України (по фазах гідрологічного режиму). Так, в монографії В.В.Гребня [2] відзначається, що до кінця 80-х років минулого століття річки країни характеризувались переважно сніговим живленням (50% від об'єму річного стоку і більше), а на сучасному етапі воно скоротилось на 12 (а в багатоводні роки на 19) відсотків, при цьому снігове живлення не дає переважну частку річного стоку. Зменшення снігового та відповідне зростання частки підземного живлення у стоці річок сприяло вирівнюванню внутрішньорічного його розподілу, а роль найбільш багатоводної фази у внутрішньорічному розподілі стоку річок країни (за винятком її північного сходу) зараз належить літньо-осінній межені, частка якої в у річному об'ємі стоку в цілому по рівнинній території становить 44%, коливаючись від 38 до 50% по різних провінціях.

З іншого боку, як добре ілюструють різниці інтегральні криві правобережних приток (рис.5) та лівобережних приток (рис.6), починаючи з 1960-х років до 1980-83 рр., спостерігалася

багатоводна фаза, після чого по теперішній час на річках досліджуваної території має місце маловодна фаза тривалістю більше 30 років. Дещо відрізняється від інших різницева інтегральна крива на р. Славська – смт. Славське, але коливання стоку тут все ж синфазне з сусідніми річками.

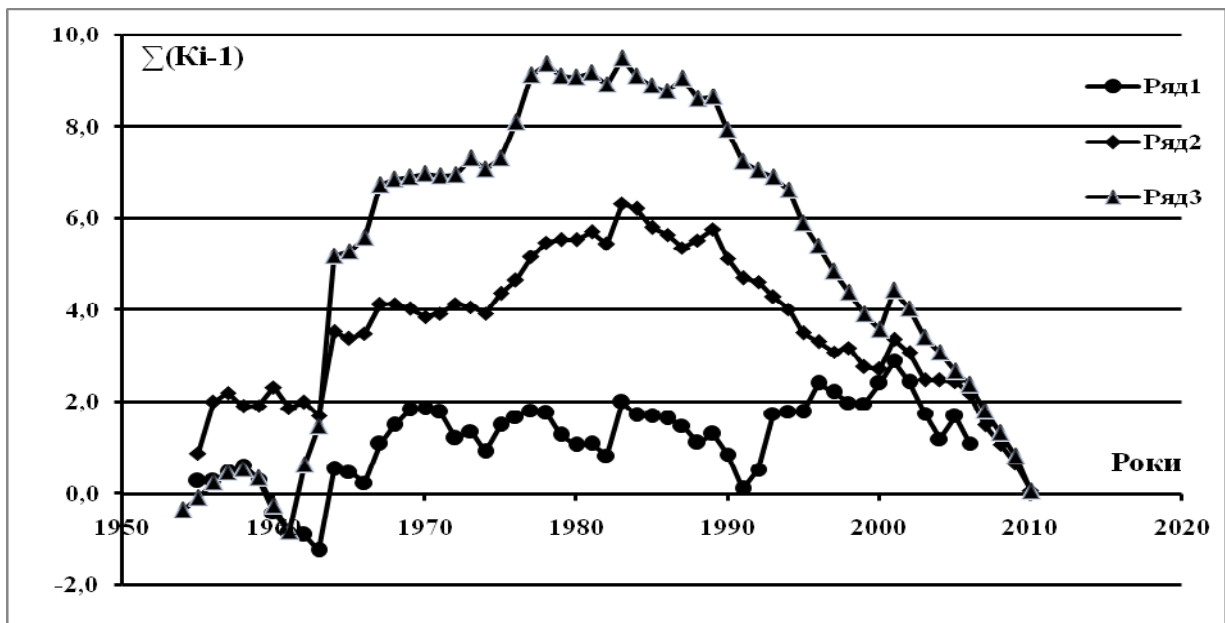


Рис.5- Різницеві інтегральні криві максимальних витрат води весняного водопілля річок басейну Дністра: ряд 1- р. Голованка - м.Тухля; ряд 2- р.Стрий-с.Матків; ряд 3- р.Славська - смт. Славське

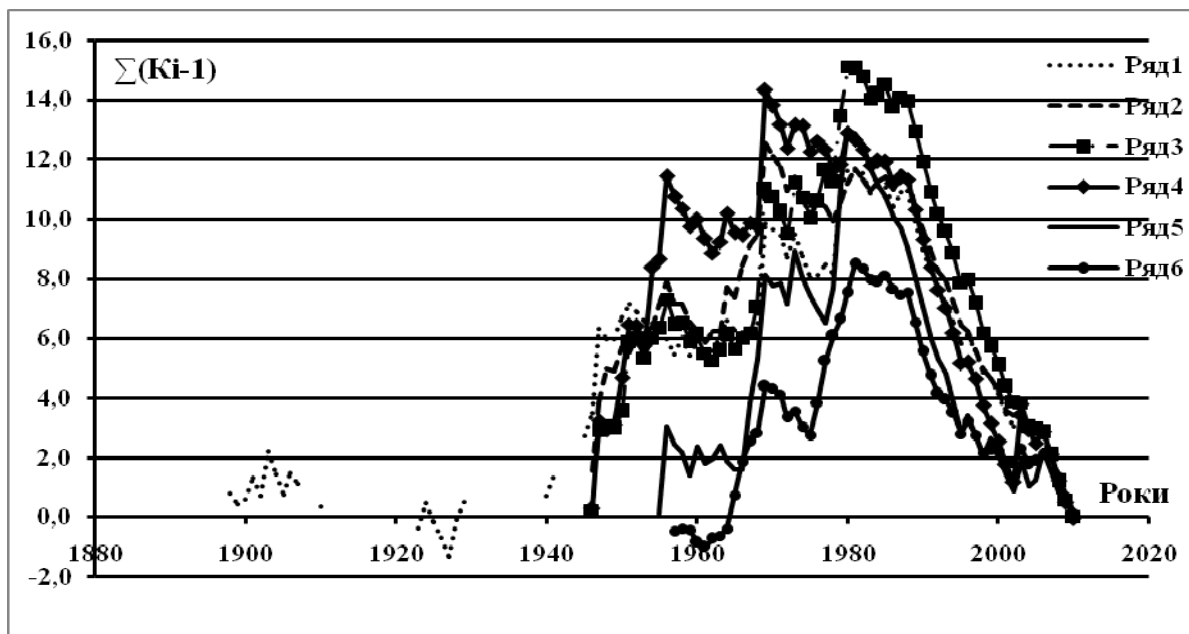


Рис.6 - Різницеві інтегральні криві максимальних витрат води весняного водопілля річок басейну Дністра: ряд 1- р. Серет - м. Чортків; ряд 2- р. Золота Липа - с. Бережани; ряд 3- р. Коропець - м. Підгайці; ряд 4 – р. Стрипа-х. Каплинці; ряд 5 – р. Нічлава - с. Стрільківці; ряд 6 – р. Свіж – смт. Букачівці

В цілому практично на всіх річках спостерігається повний цикл водності, що дозволяє використовувати статистичні методи для визначення розрахункових характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні Дністра.

Середні значення рядів  $\bar{Q}_m, \bar{Y}_m$ , коефіцієнти варіації  $C_v$  і асиметрії  $C_s$  розраховані за допомогою методів моментів і найбільшої правдоподібності.

Найбільші значення середніх максимальних модулів стоку весняного водопілля відмічаються у правобережній (гірській) частині басейну і становлять  $0,20-0,30 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$  (рр. Стрий, Яблунька, Рибник, Опір та ін.), для лівобережних приток величини модулів значно менші і коливаються в межах  $0,07 - 0,02 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$  і лише на декількох постах досягають більших значень – від  $0,11$  (р.Ушиця - с.Зіньків) до  $0,23 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$  (р.Батиг-с.Заміхів); закономірно найменші значення спостерігаються у нижній, більш посушливій, частині басейну – максимальні середні модулі становлять тут  $0,03-0,01 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$  (р.Реут, Куболта, Бик, Ікель та ін.). Що стосується самого Дністра, то тут модулі змінюються від  $0,14 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$  (р. Дністер – с.Стрілки,  $F=384 \text{ км}^2$ ) до  $0,01 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$  (р. Дністер – с.Олонешти,  $F=68900 \text{ км}^2$ ). Значення коефіцієнтів варіації й асиметрії також змінюються в доволі широкому діапазоні. Коефіцієнти варіації максимальних витрат  $C_v$ , розраховані за допомогою методів моментів, змінюються від  $0,34$  (р. Дністер – с. Жванець) до  $1,96$  (р. Марківка - с. Підлісівська), при середньому по території значенні  $0,87$ . Коефіцієнти асиметрії  $C_s$  коливаються в межах від  $0,03$  (р.Дністер – с.Олонешти) до  $5,24$  (р.Лужанка - с.Гошів), а співвідношення  $C_s / C_v$  можна осереднити на рівні  $2,0$ . Отримані за методом найбільшої правдоподібності величини  $C_v$  змінюються від  $0,34$  (р. Дністер - с.Жванець) до  $2,13$  (р.Балцата-с.Балцати) з середнім значенням  $0,90$ , а коефіцієнти асиметрії  $C_s$  коливаються від  $0,05$  (р.Болухівка - с.Томашівці) до  $8,95$  (р.Картоплянка-с.Картоплянка); співвідношення  $C_s / C_v = 2,68$ , що дозволяє осереднити його на рівні  $2,5$ . Як відзначалося вище, при  $C_v > 0,5$  заслугове перевагу метод найбільшої правдоподібності, отже надалі в якості розрахункових будуть використані саме значення, отримані за цим методом і, відповідно,  $C_s / C_v = 2,5$ .

Значення середніх шарів стоку весняного водопілля в межах досліджуваної території також змінюються в доволі широкому діапазоні - від  $5,43$  (р.Балцата-с.Балцати) до  $241$  мм (р. Стрий - с. Матків). Коефіцієнти варіації шарів стоку, розраховані за допомогою методів моментів змінюються від  $0,30$  (р. Стрий - с.Ясениця) до  $1,39$  (р.Ушиця - с.Зіньків) при середньому їх значенні  $0,68$ ; коефіцієнти асиметрії  $C_s$  - від  $0,07$  (р.Дністер - м.Могилів-Подільський) до  $3,74$  (р.Стрипа - м.Бучач), а співвідношення  $C_s / C_v$  осереднено на рівні  $1,5$ . Величини коефіцієнтів варіації, отримані за методом найбільшої правдоподібності, практично співпадають з моментними оцінками і коливаються від  $0,30$  (р.Стрий - с.Ясениця) до  $1,51$  (р.Балцата-с.Балцати) при середньому значенні  $0,70$ , а співвідношення  $C_s / C_v = 2,0$ . Для шарів стоку, також як і для витрат води, в якості базових взяті значення, визначені за методом найбільшої правдоподібності.

Величини максимальних модулів і шарів стоку 1%-ї забезпеченості розраховані при  $C_s / C_v = 2,5$  та  $C_s / C_v = 2,0$ , відповідно. Характеризуючи отримані параметри, слід відзначити, що також, як і у випадку середніх значень, найбільші величини модулів і шарів стоку відмічаються у правобережній гірській частині – до  $2,01 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$  (р. Дуба - с.Дуба) та  $537$  мм (р. Стрий - с.Матків). Мінімальні значення припадають на нижню, степову частину. Так, мінімальний модуль стоку  $q_{1\%}$  ( $0,05 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ ) і шар стоку  $Y_{1\%}$  ( $27,4$  мм) відмічаються на р. Реут - м. Флорешти. В середній частині басейну Дністра значення модулів і шарів стоку 1%-ї забезпеченості коливаються в середньому в межах  $0,10-0,50 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$  та  $60-250$  мм.

### Висновки:

- в гідрологічному відношенні басейн р. Дністер добре вивчений, а наявність інформації по 98 гідрологічних постах дозволяє достатньо надійно розраховувати статистичні параметри рядів максимального стоку річок;
- сучасні зміни у внутрішньорічному розподілі річок країни зумовлюють зменшення максимальних витрат води весняного водопілля, але для гірських правобережних приток Дністра ці зміни практично відсутні;
- наявність повних циклів коливань водності на річках досліджуваної території дозволяє використовувати статистичні методи для визначення розрахункових параметрів максимального стоку весняного водопілля;
- для басейну річки Дністер розраховані значення максимальних витрат і шарів стоку 1%-ї ймовірності перевищення, які визначені за даними до 2010 року включно, і отже, характеризують сучасний стан максимального стоку весняного водопілля на досліджуваній території.

**Перспективи подальших досліджень.** Отримані результати будуть в подальшому використані при обґрунтуванні методики визначення максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Дністер.

### Список літератури

1. Вишневецький В.І. Зміни клімату і річкового стоку на території України і Білорусі // Наук.праці УкрНДІГМІ. – 2001. – Вип.249. – С.89-105.
2. Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). – К. : Ніка-Центр, 2010. – 316 с.
3. Гонченко Є.Д., Овчарук В.А., Шакирзанова Ж.Р. Дослідження впливу сучасних змін клімату на характеристики максимального стоку весняного водопілля на річках Полісся //Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2010. – Т.3(20). – С. 50-59.
4. Клімат України: у минулому... і майбутньому? : Монографія / [Кульбіда М.І., Барабаш М.Б., Єлістратова Л.О. та ін.]; за ред. М.І.Кульбіди, М.Б.Барабаш. – К. : Сталь, 2009. – 234 с
5. Паламарчук М.М., Загорчевна Н.Б. Водний фонд України: Довідковий посібник. – К.: Ніка-Центр, 2001. – 392 с.
6. Рождественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. - Л.:Гидрометеоздат, 1974.- 423 с.
7. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – Санкт – Петербург, 2007 - 278с.
8. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. – Санкт-Петербург, 2010. – 162 с.
9. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик (СНиП 2.01.14-83). - Л.: Гидрометеоздат, 1984. - 484с.

### Статистические параметры временных рядов максимальных расходов воды и слоев стока весеннего половодья в бассейне реки Днестр

**Овчарук В.А., Траскова А.В.**

*На базе современной исходной информации по максимальному стоку весеннего половодья проанализированы тенденции в изменениях стоковых характеристик и рассчитаны основные статистические параметры временных рядов максимальных расходов воды и слоев стока в бассейне реки Днестр.*

**Ключевые слова:** максимальный сток весеннего половодья, однородность, статистические параметры.

### Statistical parameters the time series maximum discharges and layers of spring high water flow in the basin of the river Dniester

**Ovcharuk V.A., Traskova A.V.**

*On the basis of the modern source of information on the maximum spring flood runoff analyzed by trends in the changes of runoff characteristics and calculated the principal statistics of the time series of maximum water flow and layers of flow in the basin of the river Dniester.*

**Keywords:** maximum spring flood runoff, uniformity, statistical parameters.

УДК 551.465.4

Ю.С. Тучковенко, д.геогр.н., Д.В. Кушнір, інж.

Одесский государственный экологический университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД В ТИЛИГУЛЬСКОМ ЛИМАНЕ

*Приведены результаты расчетов и анализа трехмерной ветровой циркуляции вод на акватории Тилигульского лимана при стационарных ветрах различных направлений. Расчеты выполнены с использованием гидродинамической модели Delft3D-FLOW на криволинейной расчетной сетке.*

**Ключевые слова:** Северо-западное Причерноморье, Тилигульский лиман, динамика вод, моделирование.

**Введение.** Тилигульский лиман расположен на украинской части побережья северо-западной части Черного моря, в 60 км от г.Одессы на границе Одесской и Николаевской областей (46° 39,3' - 47° 05,3' с.ш., 30°57,3' - 31°12,7' в.д.). Лиман представляет собой затопленную морскими водами долину р.Тилигул и вытянут субмеридионально с северо-северо-запада на юго-юго-восток. В настоящее время его длина составляет 45-52 км, ширина изменяется на отдельных участках от 1 до 4,5 км. При отметке уровня воды в лимане -0,4 м БС (метров в Балтийской системе высот и глубин) площадь зеркала его водной поверхности составляет 129 млн. м<sup>2</sup>, объем вод – 693 млн. м<sup>3</sup>. Южная и центральная части лагуны представляют собой котловины с преобладающими глубинами в диапазоне 10-16 м, разделенные мелководной перемычкой (рис. 1а). Максимальная глубина в южной части лагуны достигает 22 м. Северная часть лагуны, в которую впадает р.Тилигул, мелководная, с глубинами менее 4 м. Средняя глубина лимана составляет около 5 м.

В настоящее время в результате антропогенной деятельности на водосборном бассейне Тилигульского лимана и климатических изменений, существенно уменьшился боковой поверхностный приток пресных вод в лиман, следствием чего является осолонение и обмеление лимана, увеличение концентрации биогенных веществ и темпов продуцирования органического вещества автотрофами. Последующее отмирание и биохимическое разложение органического вещества водорослей способствует развитию дефицита содержания кислорода в воде, гибели гидробионтов, обеднению биоразнообразия водной флоры и фауны. Складываются неблагоприятные условия для рыболовства, рекреации и туризма [1]. Например, летом 2010 г. из-за аномальных погодных условий: сильные ливни в июне-июле и аномально высокая температура воды в июле-августе, – наблюдалась массовая гибель рыбы (бычков, глоссы). На отдельных участках побережья было обнаружено 20 кг мертвой рыбы на квадратный метр. В разных районах лимана локальные заморы рыб наблюдались также летом 1999, 2000, 2001, 2006, 2007, 2013 гг.

Для поиска путей улучшения гидроэкологического режима Тилигульского лимана необходимо знать особенности циркуляции вод на его акватории, которая определяет водо- и массообмен между отдельными частями лимана. Доминирующее влияние на формирование циркуляции вод в лимане оказывает ветровое воздействие. Измерения течений в Тилигульском лимане, выполненные с 1979 по 1988 г., показали, что поля ветровых течений имеют исключительно сложный характер [2]. Попытки получить на основе натуральных инструментальных наблюдений детальную картину течений в лимане при стабильных ветрах не дали положительных результатов. Поэтому

для получения цельной картины баротропных ветровых течений в лимане В.М. Тимченко [2, 3] была использована диагностическая гидродинамическая модель А.И. Фельзенбаума [4]. Позднее, авторами [5], с помощью модифицированного варианта имитационной гидродинамической модели МЕССА была рассчитана трехмерная структура ветровых течений в лимане при стационарных ветрах различных направлений. Модель МЕССА (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment) реализована в  $\sigma$ -системе координат по вертикали, однако в горизонтальной плоскости используется обычная равномерная пространственная расчетная сетка [6]. Последнее свойство модели не позволяет детально описать пространственную структуру ветровых течений в области достаточно узкого прибрежного мелководья, с учетом сложной конфигурации береговой линии и рельефа дна. Этому недостатка лишены современные гидродинамические модели, реализованные в криволинейной, неравномерной в горизонтальной плоскости системе координат. К числу таких моделей относится Delft3D-FLOW [7].

Цель данной работы заключается в представлении результатов моделирования ветровой циркуляции вод в Тилигульском лимане, с детальным разрешением пространственной структуры течений, полученных с использованием гидродинамической модели Delft3D-FLOW.

**Описание используемой модели.** Подробное описание имитационной гидродинамической модели Delft3D-FLOW приведено в руководстве по ее использованию [8]. Использовался 3-D пространственный вариант модели. Модель базируется на численном решении уравнения Навье – Стокса для несжимаемой жидкости на мелкой воде в приближении Буссинеска. Для уравнения скорости вертикального движения принимается гидростатическое приближение. Вертикальные компоненты скорости течений рассчитываются через уравнение неразрывности. Перенос веществ и тепла в 3-D системе координат моделируется с помощью уравнения адвекции-диффузии, в которое также включены члены источников и стоков, для учета потоков массы и тепла.

Конечно-разностная аппроксимация уравнений модели выполняется на C-сетке Аракавы: скалярные величины задаются в центрах элементарной расчетной ячейки, а нормальные компоненты скорости – на соответствующих ее гранях. Для дискретизации гидродинамических уравнений модели в 3-D пространстве, по горизонтали используется структурированная ортогональная криволинейная система координат, а по вертикали –  $\sigma$ -система координат (хотя имеется возможность использования прямоугольной  $z$  – системы).

Акватория Тилигульского лимана покрывалась специально сгенерированной криволинейной расчетной сеткой, состоящей из  $226 \times 52$  расчетных ячеек с 15 расчетными уровнями по вертикали в  $\sigma$ -системе координат. Размеры расчетных ячеек изменяются плавно вдоль продольной оси лимана в пределах от 100 до 450 м и от 75 до 320 м – в поперечном направлении (рис. 1б). Сетка точно описывает основные особенности геоморфологического строения лимана: конфигурацию его берегов, распределение глубин. Ортогональность горизонтальной криволинейной расчетной сетки не превышает 0,01 внутри вычислительной области. На границах расчетной сетки максимальные значения косинусов углов не превышают 0,08.

На основании критерия Куранта был определен временной шаг решения уравнений модели, который при моделировании принимался равным 60 с.

**Исходные данные.** В работе используется уточненная по сравнению с [5], батиметрическая карта Тилигульского лимана (рис. 1а), построенная доц. Грибом О.Н. на основе обобщения данных промерных работ, выполненных осенью 2010 и 2012 гг.



с помощью электронного эхолота Fishfinder-250 (Garmin). Позиционирование на местности осуществлялось с использованием навигатора GPS-72 (Garmin).

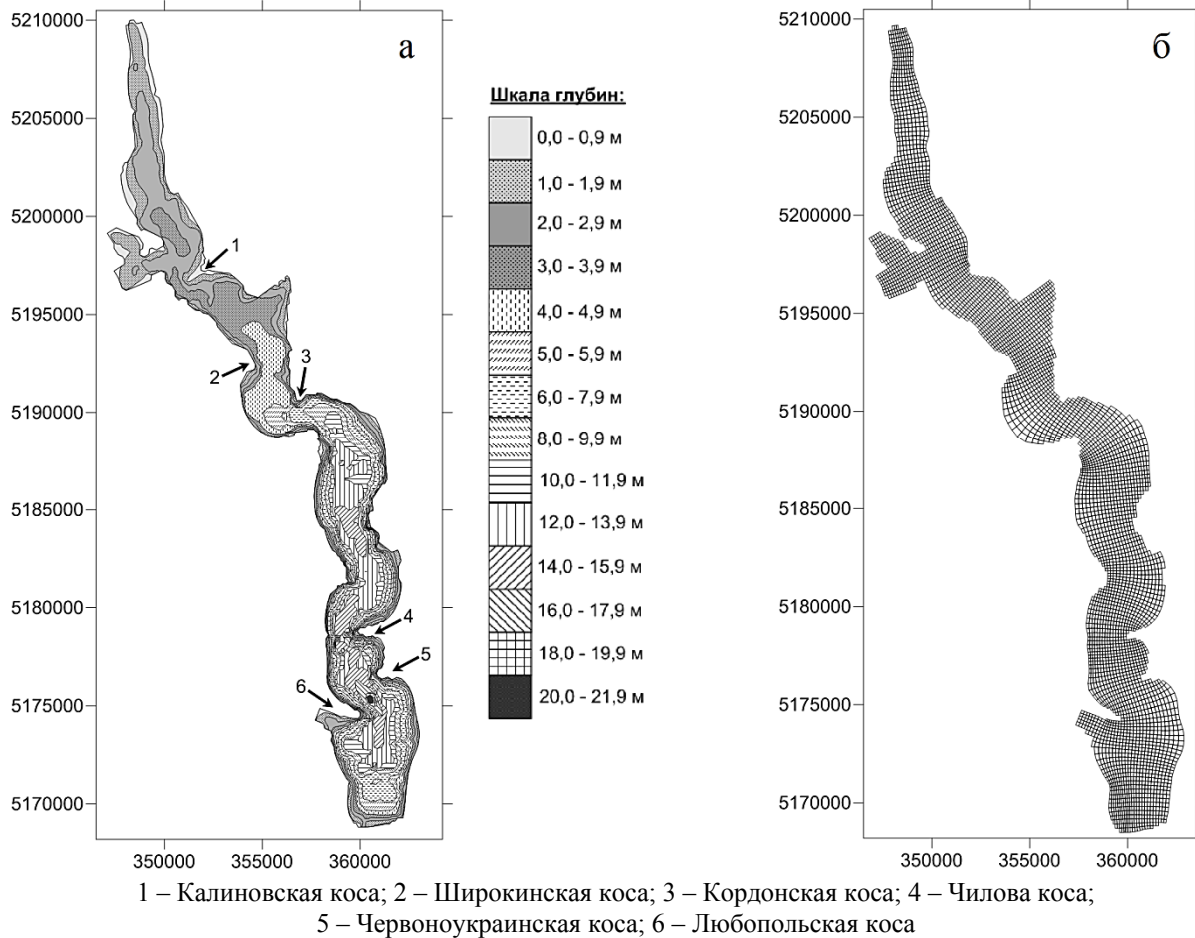


Рис. 1 – Батиметрическая карта Тилигульского лимана с глубинами, соответствующими уровню моря минус 0,4 м БС (а)\*. Горизонтальная криволинейная расчетная сетка акватории Тилигульского лимана (б).

\*На осях координат указаны отметки СУПМ (сетки по универсальной поперечной проекции Меркатора) с шагом 5000 м, зона 36

Расчеты ветровой циркуляции вод проводились при стационарных ветрах скоростью 5 м/с доминирующих (по повторяемости) направлений. По данным многолетних наблюдений на береговых гидрометеорологических станциях в портах Одесса, Южный, Очаков, доминирующими являются ветры С (повторяемость 15-33 %) и Ю (14-22 %) направлений [9]. Значительная повторяемость западных ветров (около 15 %) отмечается на станциях Одесса и Очаков. Ветровые условия в открытой части северо-западного шельфа Черного моря характеризуются преобладанием ветров С и СВ направлений [9].

Расчеты установившейся ветровой циркуляции вод для каждого направления ветра выполнялись на протяжении 10 сут модельного времени. Водообмен лимана с морем через соединительный канал не учитывался.

**Обсуждение результатов моделирования.** Расчеты ветровой циркуляции вод в Тилигульском лимане показали, что из-за вытянутости лимана в меридиональном направлении, значительной изрезанности береговой линии и изменчивости пространственной ориентации различных ее участков, пространственная структура течений зависит от направления ветра. При продольных по отношению к меридиональной оси лимана ветрах (северном и южном) имеет место интенсификация

направленных по ветру потоков в прибрежных, относительно мелководных областях (рис. 2). Вдоль продольной осевой линии лимана, которой соответствуют максимальные в каждой части лимана глубины, формируются придонные градиентные противотечения, генеральное направление которых противоположно ветру. Эти придонные компенсационные противотечения существенно влияют на поверхностные дрейфовые течения, ослабляя их. При этом вектора дрейфовых течений отклоняются вправо от направления ветра на угол до  $90^\circ$ . Обращает на себя внимание, что вдольбереговой поток у западного берега центральной и южной частей лимана более интенсивен, чем у восточного берега. Эта особенность наблюдается как при северных, так и при южных ветрах. Объясняется она особенностями конфигурации береговой линии и распределением глубин вдоль соответствующих границ лимана.

При поперечных по отношению к оси лимана ветрах (западном и восточном) пространственная структура ветровых течений приобретает еще более сложный и менее предсказуемый характер, чем при продольных. Продемонстрируем это на примере западного ветра (рис. 3). В целом, генеральное направление переноса вод в поверхностном слое совпадает с направлением ветра (направлено от западного берега лимана к восточному). Вдоль наветренного, западного берега лимана образуются отчетливо выраженные зоны дивергенции и конвергенции поверхностных дрейфовых течений. Зоны дивергенции соответствуют участкам прибрежной зоны, где береговая линия «вогнута» в западном направлении (заливам), а зоны дивергенции – «выпуклостям» береговой линии в восточном направлении (мысам-косам). В открытой, глубокой части акватории лимана, ориентированной вдоль его продольной оси, дрейфовые поверхностные течения более интенсивны, чем в случае продольных ветров; поскольку они в меньшей мере ослабляются придонными компенсационными течениями, которые при поперечных ветрах менее интенсивны, чем при продольных, и на отдельных участках имеют значительную меридиональную составляющую.

Северо-восточный ветер является поперечным для северной части лимана (выше Широкинской косы) и имеет как продольную, так и поперечную составляющие вектора скорости ветра для центральной и южной частей. Однако по величине эти составляющие меньше, чем в рассмотренных выше случаях северного и западного ветров. Из рис. 4 видно, что протяженные, однонаправленные по глубине вдольбереговые потоки развиваются в верховье лимана, а также вдоль западного берега центральной части лимана (от Марьяновского залива до Любопольской косы). Вдоль восточного берега центральной и южной частей лимана, а также возле Любополя (западное побережье), вдольбереговой поток разрывается в районах мысов - кос и не является непрерывным потоком. Хорошо выраженные зоны дивергенции поверхностных течений отмечаются в районах участков восточного побережья, которые представляют собой вогнутости береговой линии (заливы), ориентированные противоположно направлению ветра (Царегский и Кефальный заливы, залив юго-западнее Червоноукраинской косы). В открытой части акватории лимана поверхностные течения направлены по ветру: от восточного берега к западному. В придонном слое компенсационный градиентный поток меридиональной направленности также разрывается на части поперечными придонными течениями, направленными на запад, для компенсации оттока воды в зонах дивергенции течений.

Отдельно следует остановиться на анализе пространственной структуры баротропной циркуляции вод в Тилигульском лимане, которая характеризует особенности интегрального по глубине водообмена между различными частями акватории. Из рис. 2а-4а видно, что на акватории лимана можно выделить четыре части, водообмен между которыми затруднен. Границы между частями проходят в районах Чиловой, Калиновской кос, коленноподобного изгиба лимана между Кордонской и Широкинской косами. Между этими границами формируются замкнутые циркуляционные структуры в соответствующих частях лимана.

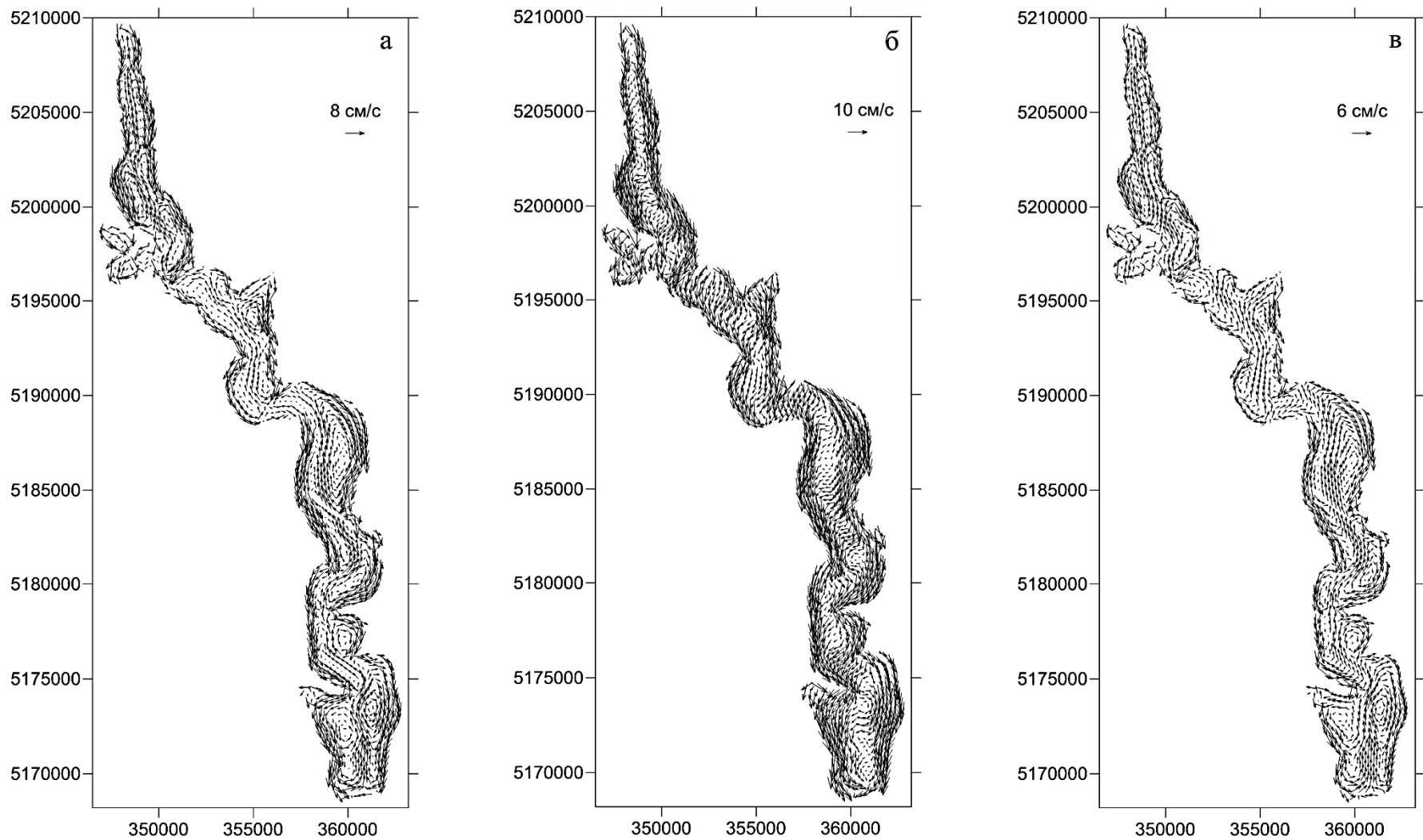


Рис. 2 – Поля векторов\* средних по глубине (а), поверхностных (б) и придонных (в) течений в лимане при стационарном ветре северного направления скоростью 5 м/с.

\* Для удобства чтения вектора прорежены с шагом 250 м.

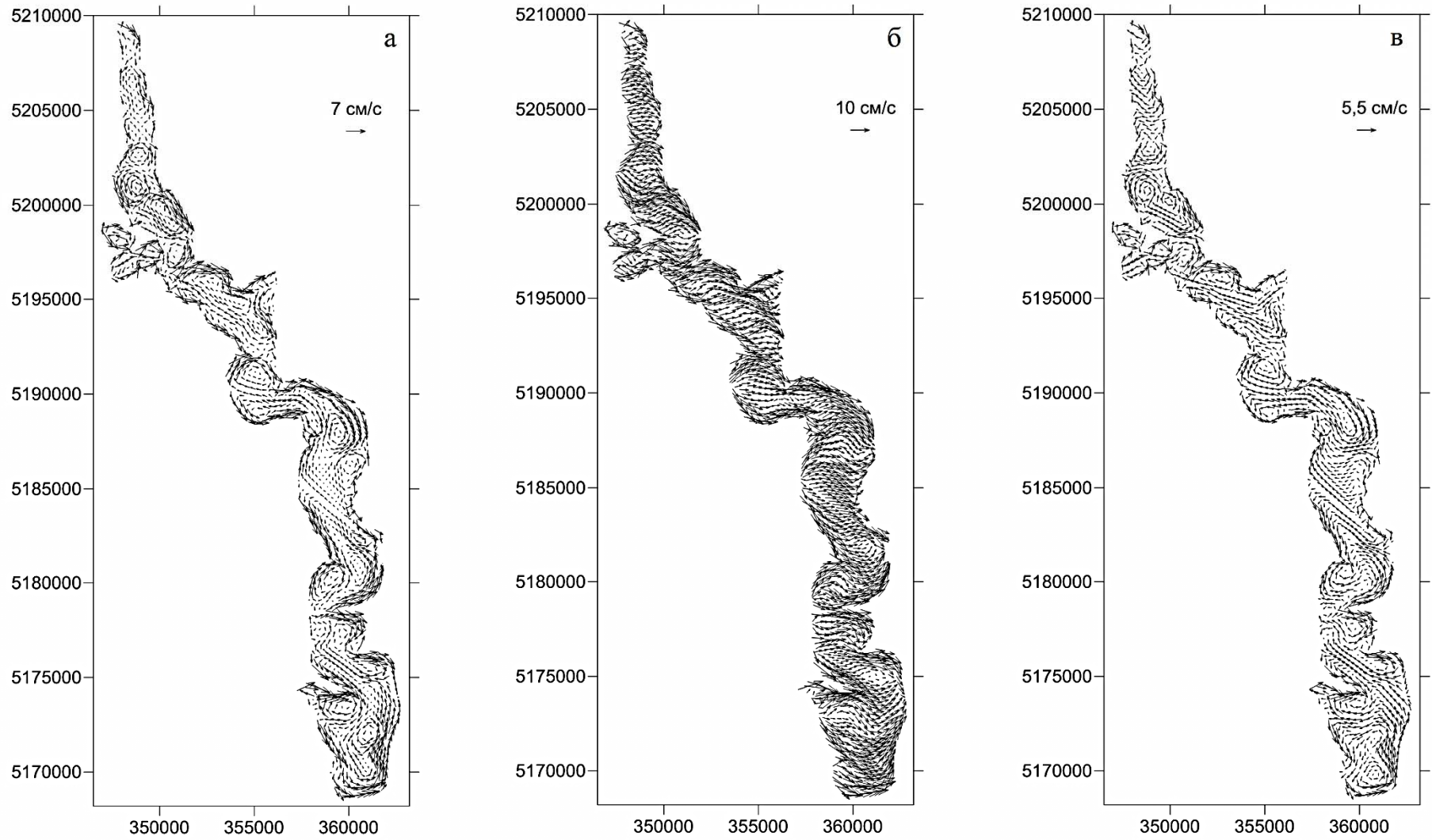


Рис. 3 – Поля векторов средних по глубине (а), поверхностных (б) и придонных (в) течений в лимане при стационарном ветре западного направления скоростью 5 м/с.

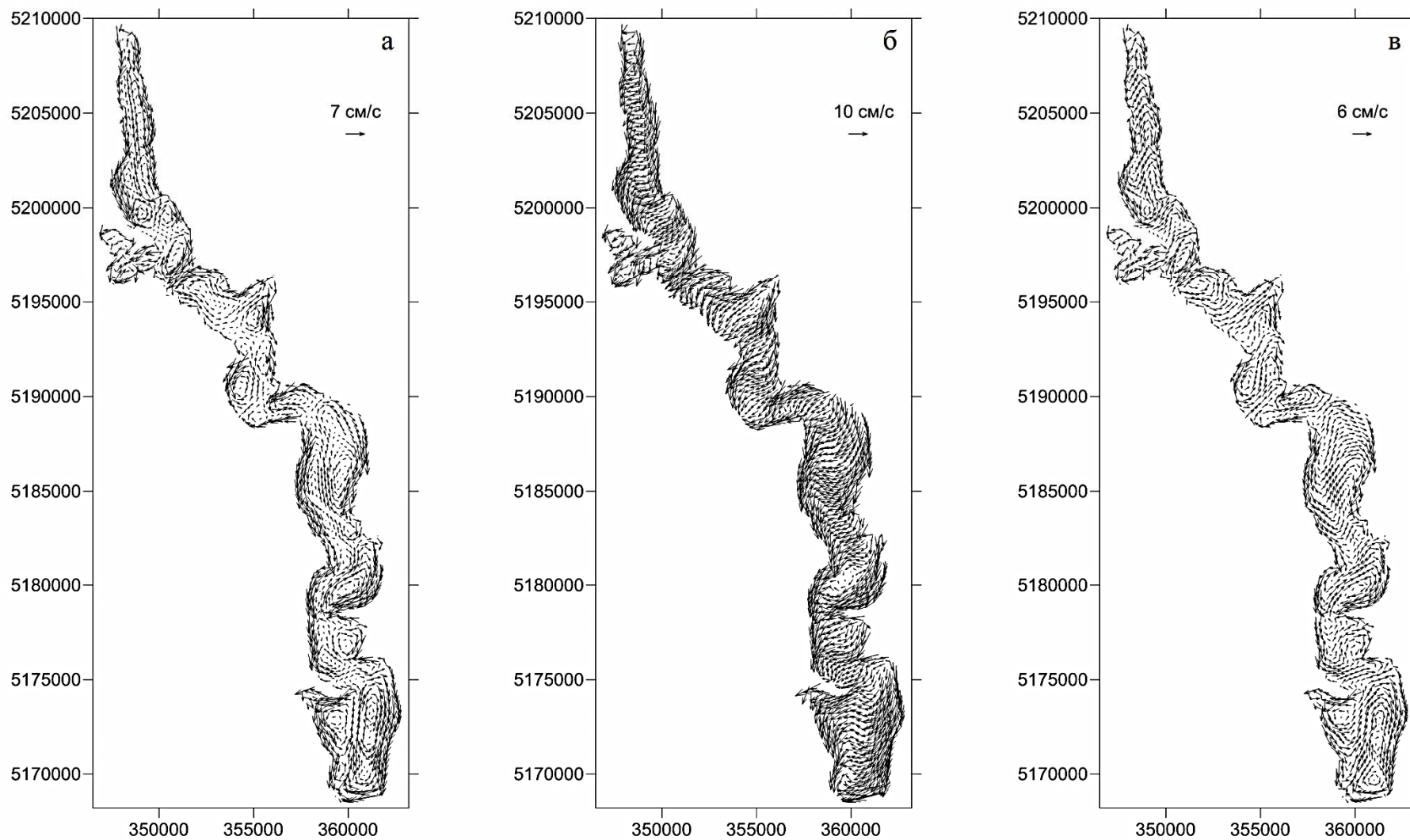


Рис. 4 – Поля векторов средних по глубине (а), поверхностных (б) и придонных (в) течений в лимане при стационарном ветре северо-восточного направления скоростью 5 м/с.



Как было сказано во введении, одной из главных гидроэкологических проблем Тилигульского лимана, являются периодически возникающие в летний период года массовые заморы гидробионтов на локальных участках прибрежной зоны лимана. Одной из причин развития заморов в прибрежной зоне лимана может быть подток на мелководье обедненных растворенным кислородом глубинных вод. Данные натурных наблюдений, выполненных летом 2010 г., свидетельствуют, что в глубокой центральной части лимана растворенный кислород может отсутствовать не только в придонном слое, а и на глубинах ниже границы верхнего квазиоднородного перемешанного ветром слоя ( $> 5$  м). Подток в мелководную прибрежную зону глубинных вод с дефицитом кислорода будет происходить в зонах дивергенции дрейфовых течений у наветренных берегов. На рис. 5 приведены рассчитанные по модели поля вертикальной составляющей скорости ветровых течений для ветров западного и северо-восточного направлений. Видно, что ядра интенсивного подтока глубинных вод у наветренных участков берега имеют ярко выраженный очаговый характер. Именно на этих участках прибрежного мелководья следует ожидать развития заморов рыбы и других гидробионтов, при ветрах соответствующих направлений.

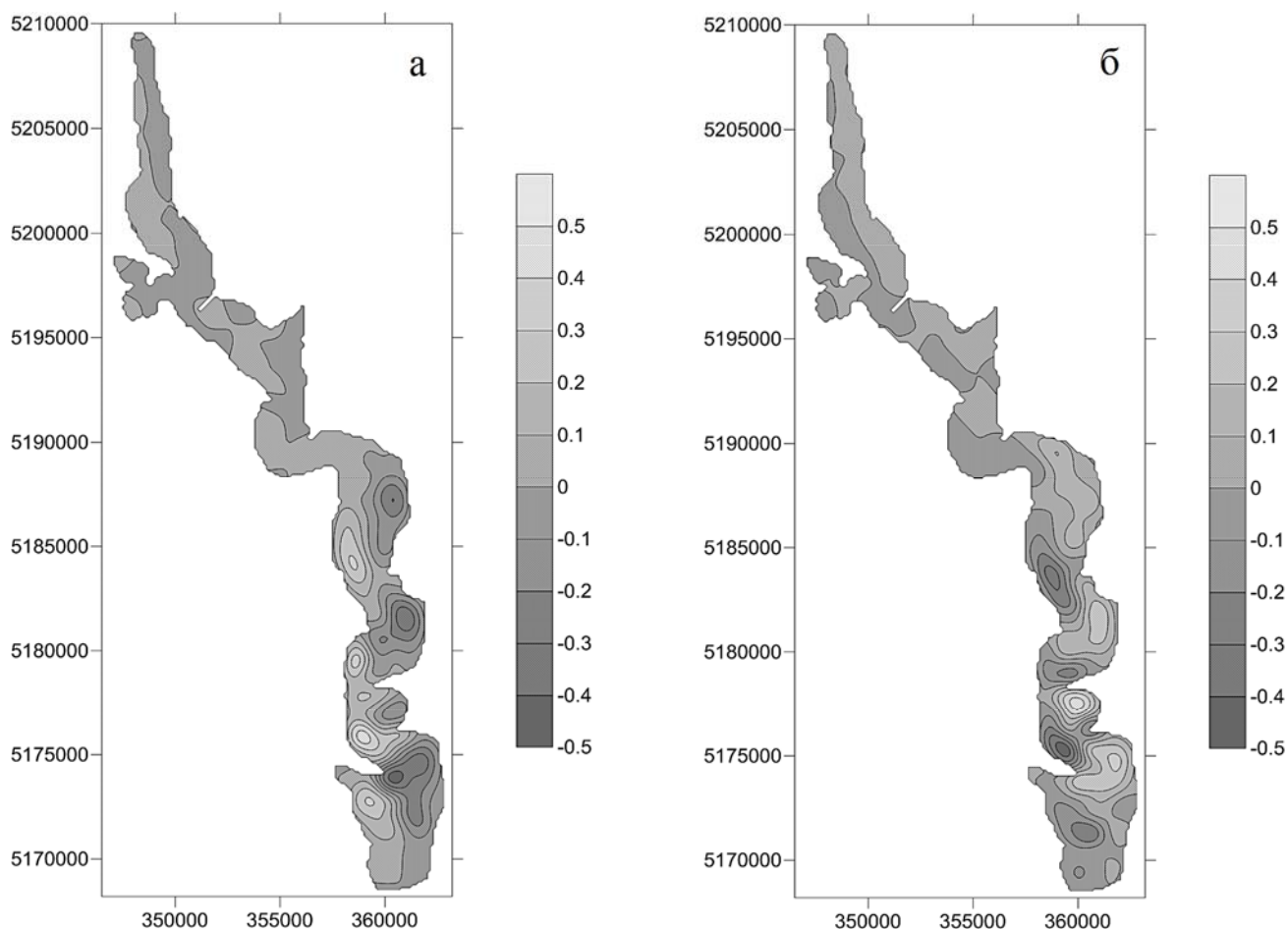


Рис. 5 – Поля вертикальной составляющей скорости ветровых течений в лимане ( $\times 10^{-3}$  м/с) при стационарных ветрах западного (а) и северо-восточного (б) направлений.

**Выводы.** Использование имитационной гидродинамической модели Delft3D-FLOW для моделирования ветровой циркуляции вод Тилигульского лимана позволило выявить особенности пространственной структуры ветровых течений в различных частях его акватории. Установлено, что из-за вытянутости лимана в меридиональном направлении, значительной изрезанности береговой линии и изменчивости пространственной ориентации различных ее участков, пространственная структура течений определяется направлением ветра.

При продольных по отношению к меридиональной оси лимана ветрах, в прибрежных, относительно мелководных областях формируются интенсивные, протяженные, однонаправленные по глубине потоки. Вдоль продольной осевой линии лимана, формируются направленные противоположно ветру придонные градиентные противотечения, которые ослабляют дрейфовые течения в поверхностном слое.

При поперечных по отношению к оси лимана ветрах, протяженные интенсивные вдольбереговые потоки вод в центральной и южной частях лимана не образуются. Интенсификация прибрежных течений имеет локальный характер, обусловленный конфигурацией береговой черты. В открытой, глубокой части акватории лимана дрейфовые поверхностные течения более интенсивны, чем в случае продольных ветров, поскольку они в меньшей мере ослабляются придонными компенсационными течениями.

Установлено, что в случаях, когда вектор скорости ветра направлен по нормали к достаточно протяженному участку береговой линии лимана, которая является наветренной, то на этих участках в заливах (вогнутостях береговой линии в сторону противоположную ветру) образуются локальные зоны дивергенции поверхностных течений, которым соответствует подток в прибрежную мелководную зону глубинных вод, обедненных кислородом. Высказана гипотеза, что именно на этих участках прибрежного мелководья глубоких южной и центральной частей лимана могут возникать заморы рыбы и других гидробионтов, при ветрах соответствующих направлений.

На основе анализа пространственной структуры баротропной циркуляции вод выделены четыре части лимана, интегральный по глубине водообмен между которыми затруднен. Границы между частями проходят в районах Чиловой, Калиновской кос, коленноподобного изгиба лимана между Кордонской и Широкинской косами.

### Список литературы

1. Тучковенко Ю.С. Главные гидроэкологические проблемы Тилигульского лимана / Ю.С. Тучковенко, О.А. Тучковенко // Матеріали всеукр. науково-практ. конф. «Лимани північно-західного Причорномор'я: актуальні гідроекологічні проблеми та шляхи їх вирішення».- Одеса: ОДЕКУ, 12-14 вересня 2012 р. – С. 63-66.
2. Тимченко В.М. Эколого-гидрологические исследования водоемов северо-западного Причерноморья: Монография / В.М. Тимченко.– Киев: Наукова думка. – 1990.– 238 с.
3. Лиманы Северного Причерноморья: Монография / В.С. Полищук и др.; под ред. О.Г. Миронова; Ин-т гидробиологии АН УССР. – Киев: Наукова думка, 1990. – 204 с.

4. Фельзенбаум А.И. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений: Монография/ А.И. Фельзенбаум – М.: Изд-во АН СССР, 1960. - 122 с.
5. Тучковенко Ю.С. Моделирование водообмена Тилигульского лимана с Черным морем / Ю.С. Тучковенко, В.А. Иванов, О.А. Тучковенко // Морской гидрофизический журнал. – Севастополь: Морск.гидрофиз.журнал. – 2012. – № 5. – С. 42- 58.
6. Актуальные проблемы лиманов северо-западного Причерноморья: Монография / Ю.С. Тучковенко, Е.Д. Гопченко и др.; Одесский госуд. экологич. ун-т. – Одесса: ТЕС, 2012. – 224 С.
7. Исследовательский институт Deltares. – Описание и коды моделей Delft3D. – Режим доступа: <http://oss.deltares.nl/web/delft3d/>, свободный.- Язык англ.
8. Delft3D-FLOW – Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual, version 3.15. – Deltares systems, Delft, the Netherlands, 2013. – 702 pp.
9. Репетин Л.Н., Белокопытов В.Н. Режим ветра северо-западной части Черного моря и его климатические изменения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 2009.– Вып. 17.– С. 225 - 243.

**Моделювання вітрової циркуляції вод у Тилигульському лимані.**

**Тучковенко Ю.С., Кушнір Д.В.**

*Приведені результати розрахунків та аналізу трьохвимірної вітрової циркуляції вод на акваторії Тилигульського лиману при стаціонарних вітрах різних напрямлень. Розрахунки виконані з використанням гідродинамічної моделі Delft3D-FLOW на криволінійній розрахунковій сітці. **Ключові слова:** Північно-західне Причорномор'я, Тилигульський лиман, динаміка вод, моделювання.*

**Modeling of wind-driven circulation of water in the Tiligul estuary.**

**Tuchkovenko Yu. S., Kushnir D.**

*The results of the calculations and analysis of three-dimensional wind-driven circulation of water at the water area of the Tiligul estuary under stationary winds of different directions are given. The calculations are performed using a hydrodynamic model Delft3D-FLOW on a curvilinear computational grid. **Keywords:** North-Western Black Sea region, the Tiligul estuary, water dynamics, modeling.*



**Т.Н.Полубок, асп.**

*Одесский государственный экологический университет*

## **ХАРАКТЕРИСТИКА ИСТОЧНИКОВ И МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСОВ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ**

*Рассмотрены и проанализированы источники и механизмы наносов в Керченском проливе. Приведены разновидности наносов и их особенности, влияние природных и человеческих факторов образования взвеси. Раскрыты механизмы образования взвешенных наносов, охарактеризованы их источники. Определено значение речного стока, волн и течений, ветров и штормов, значимость дноуглубительных работ, а также других антропогенных факторов.*

**Ключевые слова:** *взвешенные наносы, твердый сток, осадонакопление, заносимость.*

**Введение.** Самая часто встречающаяся классификация наносных грунтов, образующих морское дно, определяется их происхождением. Занесенные с суши грунты, называются терригенными, а грунты, образовавшиеся в самом море, носят название пелагические. Наносы, в частности терригенные, могут быть как минерального, так и органического происхождения, такое же содержание и морских наносов. Эоловое поступление наносов в Азовское море и Керченский пролив отличается от механизма поступления наносов, связанных с особенностями гидродинамики водной среды. Механизм осадочных процессов обусловлен особенностями взаимодействия процессов в атмосфере и на границе раздела “подстилающая земная поверхность - воздух”, а взаимодействие водной среды и грунтов дна определяется процессами в системе “атмосфера-гидросфера-литосфера”.

**Целью данной статьи** является обобщение литературных данных об источниках взвешенного вещества в Азовском море и в Керченском проливе. Это предоставит возможность сравнить значимость каждого источника, его особенностей, охарактеризовать происхождение взвешенных наносов, что в свою очередь немаловажно при рассмотрении процессов их осаждения и переноса. Это поможет в дальнейшем разработать рекомендации по снижению заносимости морских каналов и приостановлению размыва о. Коса Тузла, рекомендовать участки укрепления берегов, обеспечить безопасную навигацию.

**Метод исследования.** В большей части статьи методом исследований является анализ публикаций: анализ данных о дноуглубительных работах [1], существенном факторе поступления в водную среду исследуемого региона взвешенного вещества; также рассмотрены результаты экологических съемок ЮгНИРО [2]; осуществлен анализ натуральных инструментальных измерений количества взвешенных наносов в водной толще; определена роль циркуляций в Керченской бухте и системы течений в проливе [3]; установлены термохалинные характеристики вод в регионе. Проведено сравнение современных измерений исследуемых характеристик с предыдущими наблюдениями [4].

**Наносы поступающие из Азовского и Черного морей.** Наиболее значительным источником заносимости Керченского пролива являются грунты поступающие из мелководного Азовского моря - твердого стока Кубани (1.2 млн.т) [5] и от абразии западных и восточных берегов моря [6]. Влияние наносов со стороны Черного моря менее существенно. Российский берег Таманского полуострова высокий и имеет часто ступенчатый оползневый характер. Сложен он в основном из лессовидной глины и окаймлен полосой пляжа, состоящего из песчано-глинистых отложений, местами с примесью ракушек, гальки и щебня. Потом, вплоть до станицы Голубицкой, берег

Азовского моря то понижается, то вновь повышается, но, начиная от этой станицы, он становится низким, а в районе дельты Кубани приобретает болотистый характер.

Интересно отметить, что в районе поселка Кучугуры на низком берегу Азовского моря наблюдаются эоловые формы рельефа в виде невысоких (1—3 м) песчаных бугров — дюн, образовавшихся под влиянием северных ветров.

Оползневые зоны имеют протяженность до десятка километров. Берега восточной, российской части Азовского моря подвержены абразии, обвальнo-оползневым процессам, выветриванию и эрозии.

Высокие скорости абразии и оползневых процессов обусловлены слабой устойчивостью береговых пород к волновому воздействию. Особенно интенсивно абразия протекает на тех участках побережья, где волнение проявляется на нагонном повышении уровня моря и при малой ширине пляжей. Средняя скорость размыва берега достигает здесь 3-4 м/год, максимальная - до 6-7 м/год.

Дополнительного изучения требует такой источник наносов как размыв берегов Керченского пролива и режим наносов Церковной банки, а также значение азовских плотностных потоков в доставке наносов в Керченский пролив и бухту, и их влияние на заносимость морских каналов.

Обмен водами и наносами Азовского моря с Черным морем происходит через Керченский пролив. По среднемноголетним данным, из Азовского моря ежегодно вытекает 49,2 км<sup>3</sup> воды, а поступает 33,8 км<sup>3</sup> черноморской воды. Среднемноголетние значения результирующего стока воды из Азовского моря в Черное составляет 15,5 км<sup>3</sup>/год. Вместе с тем существует прямая связь между изменчивостью речного стока и водообменом через Керченский пролив. При уменьшении речного стока уменьшается сток азовской воды и увеличивается приток воды из Черного моря в Азовское море. В целом за многолетний отрезок времени приходная и расходная части водного баланса моря равны между собой. Наибольшую долю приходной части образуют материковый сток (43%) и приток воды из Черного моря (40%). В расходной части преобладают сток азовской воды в Черное море (58%) и испарение с водной поверхности (40%).

***Антропогенные и природные источники наносов в Керченском проливе.*** Количество наносов поступающие с украинской части Керченского пролива составляют около 10 тыс.т, а с восточной, российской береговой зоны пролива 30 тыс.т [6].

Ежегодный объём дампинга здесь составляет около 3.6 млн. т, что превышает объём твёрдого стока реки Дон и наносов, поступающих в море вследствие абразии берегов Азовского моря (1.3 млн. т). В настоящее время в Керченском проливе и на предпроливных акваториях обоих морей расположены четыре обширных зоны дампинга: действующая свалка в районе м. Такиль и 3 закрытые свалки у м. Железный рог, южнее о. Коса Тузла и к северо-востоку от м. Хрони. Каждая из них представляет собой источник взвешенного вещества. В настоящее время к основным объектам дноуглубления в проливе относятся Бурунское колено проходного Керчь-Еникальского канала и акватория подходного канала Керченского морского торгового порта. Ежегодный объём грунтов, вынимаемых из судоходного канала в Керченском проливе и подходного в бухте, достигает 1 млн.т. Некоторый вклад наносов аккумулируемых в морских каналах, – есть следствие эрозии морского дна при воздействии на грунты размывающих скоростей: орбитальных, при ветровом волнении; градиентных, при денивеляции водной поверхности и пр. В литературных источниках обсуждается также возможность поступления мелкодисперсных наносов в судоходные каналы, в результате взмучивания наносов при траловом лове рыбы [1].

На акватории Керченского пролива расположен ряд портов и площадок рейдовой перевалки грузов - Керченский морской торговый порт и Керченский морской рыбный порт, порты Железорудного комбината и завода «Залив» в Керченской бухте; площадки рейдовой перегрузки морского торгового порта; порт Кавказ и порт Крым. Каждый из перечисленных объектов вносит свой вклад в формирование поля взвешенного вещества и негативно отражается на экосистеме пролива и бухты. В ходе реализации серии экологических съёмок в течение последнего десятилетия в портах, на припортовых акваториях, в районах рейдовой перевалки грузов были получены количественные оценки, отражающие влияние этих объектов на поле наносов и параметры водной среды. В частности показано, что швартовые операции и маневрирование судов у причальных стенок при их подходе и отходе, а также сопровождающая эти операции работа буксиров вызывает резкие повышения (в 5 – 6 раз больше фона) концентрации суммарного взвешенного в воде вещества. Причём этот эффект наблюдается, как на акваториях портов, так и на прилегающих припортовых участках. Внутри портовых акваторий содержание взвеси в верхнем и придонном слоях соответственно в 1.2 – 1.3 и в 2 – 3 раза превышает таковую в окружающих водах. При этом, вследствие ограниченности водообмена портовых вод с окружающими водами, снижение концентрации взвеси в акваториях портов происходит крайне медленно.

В ходе серии экологических съёмок ЮгНИРО в районе пункта рейдовой перевалки грузов (площадки № 450 Керченского морского торгового порта), расположенного в юго-западной части пролива, между мысами Камыш-Бурун и Малый, были зафиксированы высокие на общем природном фоне концентрации суммарной взвеси.

В то же время съёмки всей акватории пролива, выполненные в апреле 2008 г., показали, что рассматриваемый пункт рейдовой перевалки грузов представляет собой мощный источник поступления в водную среду не только взвеси, но и загрязняющих веществ, в том числе нефтепродуктов. С черноморскими течениями его влияние распространяется на значительную акваторию западной и центральной частей пролива.

Согласно результатам экологического эксперимента в мае 2005 г. в Керченской бухте в придонном слое были отмечены концентрации взвешенного вещества до 30 мг/л, при общем фоне 5-10 мг/л. В Керченском проливе, наряду с описанными выше антропогенными продуцентами взвеси, существуют природные источники суммарного взвешенного вещества, которых нет в примыкающих к проливу районах обоих морей. Эти источники обусловлены абразией берегов, ветровой деятельностью, стоком впадающих в пролив малых рек, развитой системой локальных течений при малой глубине и низкой уплотнённости донных отложений [2].

Весьма интересное явление представляют грязевые вулканы на дне Азовского моря близ берегов Таманского полуострова. Так, интенсивная грязевулканическая деятельность наблюдалась недалеко от станицы Голубицкой. Одно из извержений было отмечено 6 сентября 1799 года, над морем, в метрах 300 от берега, поднялся столб из огня и черного дыма. Около двух часов продолжалось извержение, приведшее к образованию острова из грязи диаметром свыше 100 м и высотой до 2 м. Через несколько месяцев он исчез, размытый волнами моря. Извержения грязевых вулканов обычно спокойные и нешумные, но иногда напоминают извержения настоящих вулканов, так как сопровождаются взрывом, и продукты вулканической деятельности тогда разбрасываются на сотни метров от кратера, а жидкая грязь образует большие потоки.

***Донные отложения и особенности их перемещения.*** Прибрежно-морские донные отложения могут быть подразделены на две группы. К первой относится обломочный материал, который, отложившись на дне, больше не взмучивается и не

перемещается и его стабильность может нарушиться только случайными причинами, например, возникновением подводных оползней. Отложения второй группы находятся в зоне резких колебаний гидродинамического режима и, как следствие этого, составляющий их материал, уже отложившись на дне, может снова приходить в движение и менять свое место до тех пор, пока не окажется под слоем новых отложений.

Перенос твердых частиц в водной среде может происходить двумя различными способами. Крупный материал (галька, гравий) перемещается перекачиванием по дну. Мелкий материал (песок, глина, ил), будучи взвешен, находится в толще воды более длительное время и не всегда успевает осесть на дно в фазы замедления волновых колебаний воды, когда движение одного направления сменяется на обратное. Поэтому мелкий материал увлекается вместе с общим потоком воды и частично может быть вынесен за пределы береговой зоны.

Резкий контраст между рельефом подводного берегового склона и рельефом прилегающей суши показывает, что море проделало большую работу, разрушив коренные породы, переместив и отложив в новом месте значительные массы наносов. Эта работа выполнена силами, которые действуют как в направлении поперечном относительно береговой линии, так и частично в продольном.

Движение наносов по профилю наклонного дна определяется воздействием волновых колебаний воды и силы тяжести. Движение наносов может происходить таким образом, что их частицы, совершая равные по длине пути в двух противоположных направлениях, будут практически оставаться на одном и том же месте дна. Чаще отрезки пути обломочных частиц бывают или неравной длины, или неодинакового направления. При этом происходит уже не только движение, но и перемещение массы наноса.

В большинстве случаев поперечное и продольное перемещение наносов комбинируются друг с другом, хотя каждое из них может происходить в определенных условиях и в чистом виде.

Перемещение наносов на дне потока происходит не только в форме движения отдельных зерен, но и путем смещения своеобразных форм микро- и мезорельефа. Ряби, вызываемые течением, всегда имеют асимметричный профиль – один склон у них более крутой, а другой – более пологий. Поэтому самые крупные частицы будут находиться в ложбинах, а мелкие на хребтах считает В.П.Зенкович [3].

Керченский берег имеет довольно сильное расчленение, так как на нем чередуются породы различной устойчивости. Во многих местах к морю выходят прочные сарматские рифовые известняки, созданные из скопления мшанок. Рифовые известняки образуют ряд выступающих мысов: Казантип, Зюк, Хрони, Тархан и др. Длина переймы по оси составляет около 10 км. Однако масса песчано-ракушечных наносов Казантипской переймы очень велика, так как аккумулятивная форма расширяется к южному концу и образует исключительно правильные изогнутые контуры широких террас южного берега Казантипского залива. Залив является ловушкой для больших масс наносов, мигрирующих вдоль этой части берега. Подобные же контуры аккумулятивных берегов имеют и другие бухты на керченской стороне.

Таманская сторона имеет более однообразный берег, чем керченская. На севере Тамани древние породы расположены лишь с западного конца, где они образуют возвышенности мысов Ахиллеон и Пеклы [6].

Процесс осаждения наносов связан не только с влиянием силы тяжести, но и с другими явлениями. Значительно влияет, прежде всего, общая циркуляция вод.

На осаждение наносов влияет и процесс коагуляции. При коагуляции частицы мелкодисперсных наносов соединяются в агрегаты, их физико-механические свойства

меняются. Это и создает благоприятные условия для осаждения. Коагуляция возникает под влиянием вторгающихся более соленых черноморских вод. Одновременно с явлениями коагуляции образуются своего рода плотностные течения, которые также способствуют осаждению наносов.

Наиболее интенсивное осаждение наносов наблюдается в зоне выклинивания соленых вод, что объясняется наличием относительно малых скоростей течения, а также коагуляцией мелкодисперсных фракций.

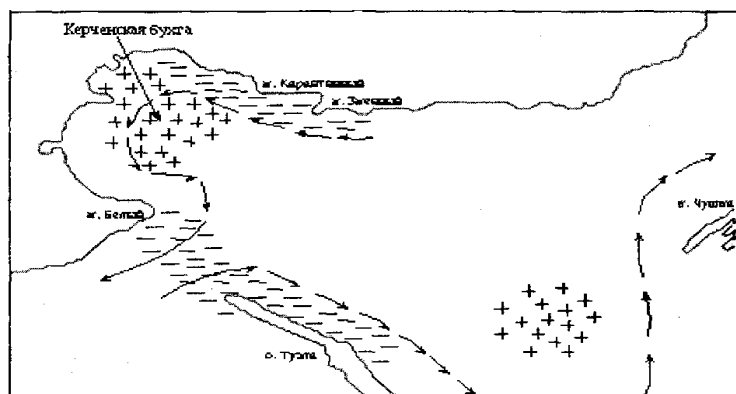
Для акватории Керченской бухты условно выделены четыре динамические ситуации. Путем анализа полей температуры, солености, гранулометрического состава наносов и течений их распределяют на четыре группы. По направлению течений выделены азовский и черноморский типы водообмена [8], распределение на акватории бухты температуры и солености свидетельствует о циркуляции воды по циклоническому и антициклоническому типам [3]. Эти циркуляции в бухте подтверждены и уточнены по распределению гранулометрического состава наносов [9].

Для всех типов преобладают течения со скоростью 6-11 см/с, максимальные значения скорости достигают 25-40 см/с.

Азовский циклонический тип характеризуется соленостью 10-13% и ее ростом в направлении с юго-востока на северо-запад. Циклоническое движение вод охватывает всю Керченскую бухту. Максимальная скорость течений наблюдается на востоке, а минимальная на западе бухты.

Черноморский циклонический тип характеризуется соленостью 14-17%, который увеличивается от поверхности к придонному слою и в направлении с запада на восток, к центру акватории бухты. При этом типе циркуляции, воды Черного моря поступают в центральную часть бухты и распространяются на север, северо-запад, особенно активно в придонном слое по подходному к Керченскому морскому торговому порту каналу. Скорости течений здесь были максимальны. Анализ гранулометрического состава наносов, отобранных со дна бухты по густой сетке, показал, что циркуляции расположены ближе к урезу, в береговой зоне, и что морские каналы заносятся в основном мелкодисперсной составляющей наносов.

В последнее время, после строительства Тузлинской дамбы, течения в Керченской бухте стали менее устойчивыми. Исследования донных осадков в Керченской бухте показали, что после сооружения дамбы на ее акваторию стал активно поступать свежий осадочный материал. Донные осадки в бухте отличаются аномальной разуплотненностью и текучестью. После строительства дамбы значительно изменились процессы заносимости Керченской бухты, рис.1 [10].



Знаками «плюс» отмечены области накопления осадков, знаками «минус» - участки размыва дна.

Рис. 1 - Схема динамики донных отложений на акватории Керченского пролива после сооружения тузлинской дамбы (2003-2005 гг.).

Результаты исследований локальной системы течений, которые были проведены ЮгНИРО в 2003-2005гг. на участке Керченского пролива от северо-западной оконечности косы Тузла до входа в Таманский залив, свидетельствуют о том, что после сооружения тузлинской дамбы здесь сформировался устойчивый поток вод восточного направления, рис.2 [10].

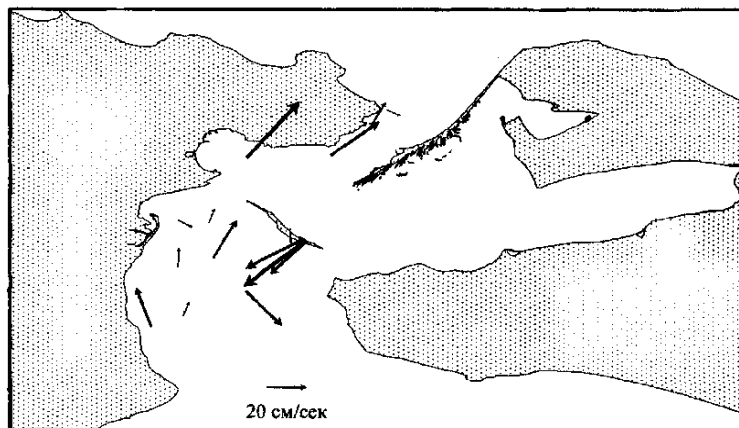


Рис.2 - Средние векторы течений в Керченском проливе 16-18 марта 2004 г. [10].

Средний слой отложения наносов на морском дне для всего района Керченской бухты за три месяца 2001г. составляет величину 0,26м. и изменяется по району на величину  $\pm 2\text{см}$  [11].

После сооружения дамбы в проливе возникли мощные источники взвешенного вещества, обусловленные абразией дна и берегов в районе Тузлы, как следствие изменений и интенсификации локальной системы течений вокруг этого острова и в Таманском заливе.

На сформировавшуюся здесь область абразии указывает преобладание в составе осадков крупноалевритовой подфракции и смена мелкоалевритового ила песком с ракушей. Иными словами, процессы размыва дна на анализируемых участках превалируют над аккумуляцией. Этому способствовали сильные (до 2 – 3 узлов) и устойчивые течения, как северного, так и южного направлений, которые наблюдаются между м.Павловский и косой Тузла. В результате ракуша, как тип донных отложений, в последние годы присутствует здесь постоянно.

Концентрация взвеси на этих участках в подповерхностном слое и у дна достигает 10 – 12 мг/л, что почти на порядок выше окружающих фоновых значений. Таким образом, все обнаруженные закономерности и рассмотренные выше участки вокруг Тузлы, возникшие в результате антропогенного вмешательства в экосистему пролива, при строительстве Тузлинской дамбы стали дополнительными источниками взвеси в его водах.

Моделирование транспорта наносов и эрозионно-аккумулятивных процессов на морском дне Керченского пролива показало, что заносимость акватории порта Керчь и подходного каналов обусловлена интенсивной эрозией дна на мелководье, Северной и Павловской узкостей. Смыв илистых донных отложений в Северной узкости является основным источником наносов, аккумулирующихся в Керченской бухте [12].

**Абразионные процессы и их влияние на количество взвеси в прибрежных водах Азовского моря.**

Структура берегов Керченского пролива обусловлена геологической историей, геологическим строением, особенностями влияния Чёрного и Азовского морей.

Согласно подсчётам, по оценкам абразии берегов, общая величина абразионного сноса с берегов составляет 249000 м<sup>3</sup>/год (423300 т/год) разнородного осадочного материала. Абразионные источники поставляют с Керченского полуострова в пролив в сумме 340500 м<sup>3</sup>/год осадочного материала различного состава. В процессе гидрогенной дифференциации часть наносов (5-18%) питает аккумулятивные формы волнового и эолового происхождения. Остальные 82-95% представляют собой взвешенные пелитовые фракции (меньше 0,1 мм), которые потенциально могут участвовать в заносимости Керченских каналов. Что касается пляжеобразующих фракций (больше 0,1 мм), то они питают пляжи и более крупные аккумулятивные формы из расчёта 0,24-0,95 м<sup>3</sup>(м×год). Такое количество не может создать достаточно крупные пляжи, способные существенно противостоять волновому влиянию на подножье клифов, а также образовать соединение, например, о. Тузлы с материком [13].

**Механизмы влияния волн и течений на процесс поступления наносов в Керченский пролив.** Волны и течения, в зависимости от характера профиля дна и очертаний берега, поднимают весьма рыхлый материал, выносимых реками, переносят их с одних участков и аккумулируют в других, а также формируют вдольбереговые потоки наносов, часть из которых доходит до Керченского пролива.

В бесприливном Азовском море волновые движения проявляются, прежде всего, в виде ветрового волнения. Оно развивается быстро и примерно через 2 ч. после возникновения ветра достигает установившегося состояния. В открытом море, как правило, образуются короткие и очень крутые волны. Они быстро затухают после прекращения ветра. Зыбь в открытом море почти не наблюдается. В холодную часть года господствующие северо-восточные и восточные ветры вызывают волнение большой силы, при котором высота волн в открытом море достигает 2,1 м, а иногда и 3,0 м. При западных и юго-западных ветрах формируются крупные волны высотой 1,5 м и более, по всей акватории моря.

В районе Керченского пролива преобладают волны высотой 1-2 м. Волны высотой около 3 метров встречаются очень редко. В Азовском море максимальная высота волн 3,5-4 м. В Черном – 5-7 м. Длина волн в Керченском проливе 10-15 м, период обычно менее 5 с. Иногда в Керченском проливе встречаются короткие и очень крутые волны, представляющие опасность для малых судов.

Ударная сила волн очень велика. Так, при ветре 4-5 баллов, ударная сила волны с периодом 11 с составляет до 5,7 т на 1 м<sup>2</sup>.

Волны, распространяющиеся из открытого моря к береговой зоне, являются основным источником механической энергии, дальнейшее преобразование которой определяет все процессы динамики береговой зоны, в том числе и процессы перемещения наносов [14].

К природным источникам взвешенного вещества в Керченском проливе, отсутствующим в прилегающих районах Чёрного и Азовского морей, относится развитая система течений, которая в условиях мелководья обеспечивает перераспределение и транспорт взвеси [14].

Штормовые прибрежные течения на песчаных берегах являются важнейшим фактором перемещения наносов. Если молы, буны и др. гидротехнические сооружения пересекают лишь часть ширины вдольберегового потока наносов, то весь материал потока по-прежнему сможет проходить перед головой сооружения, что будет вызывать лишь незначительное обмеление дна. Но обмеление неизбежно в том случае, когда гидротехническое сооружение пересечет весь вдольбереговой поток наносов [14].

При шторме большая часть самых мелких взвешенных наносов проходит по каналу не оседая. Наносы крупных фракций оседают почти полностью, а средние – примерно

на 10%. После штормов в Керченском проливе наблюдаются максимальные концентрации взвешенного вещества, достигающие 70 – 100 мг/л [2].

Вся прибрежная зона Азовского моря очень мелководна, и, чтобы в порты могли заходить морские суда с большой осадкой, к входным воротам порта должен быть проведен канал глубиной 3-4 м.

Азовское море представляет собой как бы плоскую чашу почти до краев наполненную илом. Этот ил очень текуч. Во время штормов его верхний слой взмучивается, а потом снова оседает. В морские каналы на мелководных участках Азовского моря ил частично стекает с окружающих забровочных пространств, сразу же после углубления. Суда могут идти, погрузившись в толщу ила на целый метр, но при этом их ход сильно тормозится [3].

Морфометрические особенности акватории Керченского пролива обуславливают транзитный перенос взвешенных илистых частиц между Северной и Павловской узкостями при ветрах с продольной составляющей относительно оси пролива, уменьшая, таким образом, поступление взвешенных наносов на акваторию Керченской бухты. Так как транспортирующая способность водного потока в акваторию бухты в несколько раз ниже, чем в прилегающей части пролива, это приводит к систематической аккумуляции взвешенных частиц в границах бухты. Максимальная скорость осадконакопления (1-2 мм/сут) отмечается при северо-восточных ветрах, которые имеют и наибольшую повторяемость (51%) для градации силы ветра 10 - 15 м/с, [10].

#### **Выводы.**

1. Источники взвешенного вещества в водах Керченского пролива и в Керченской бухте обусловлены поступлением наносов из Азовского моря, от абразии его берегов и размыва мелководных участков дна; транзит взвешенных наносов с жидким стоком Кубани (1.2 млн. т/год); абразии берегов пролива и поступление наносов со стоком впадающих в пролив рек; источники наносов от ветровой деятельности (эоловые наносы); транзит, отложение и взвешивание наносов при развитой системе локальных течений в бухте, при малой ее глубине и низкой уплотненности мелкодисперсной части донных отложений в портовых акваториях и подходных каналах. Антропогенные источники наносов многочисленны: Керченский морской торговый порт и его точечные причалы перевалки сыпучих и других грузов, рыбпорт и др. порты; существенное поступление наносов в водную среду наблюдается при дноуглубительных ремонтных работах в акваториях портов, в проходном и в подходных морских каналах; потеря части наносов при доставке их баржами на морские свалки; взмучивание наносов со дна отмечается также при ловле рыбы способом траления.

2. Основные механизмы доставки наносов в области их разгрузки: плотностные потоки речных наносов и плотностные потоки, возникающие при подводных оползневых процессах; тонкие глинистые наносы при извержении грязевых вулканов и дальнейшее размывание их отложений на морском дне, также как и в районах дампинга; возвратно-поступательные течения азовских и черноморских вод в Керченском проливе и индуцированные течения в проливе, циклонические и антициклонические циркуляции вод в Керченской бухте.

3. Основным механизмом образования взвешенных и влекомых наносов, и их разнообразных движений в береговой зоне, является волнение, детально рассмотренные В.П.Зенковичем [4,6] и его учениками. Орбитальные скорости волн на мелководье вносят основной вклад в деформацию морского дна в проливе и бухте, и при формировании вдольбереговых потоков наносов. Течения различного происхождения в проливе и в мелководной бухте выполняют транзитную доставку наносов в область их разгрузки в Керченской бухте. Украинский песчаный Остров Тузла существенно изменяет свою форму в плане и размер надводной его части в результате строительства Тузлинской дамбы, примыкающей к российскому берегу, из трудно разрушаемого волнами крупнообломочного материала - ракушечника ("дикаря").



### Список литературы

1. *Илюшин В.Я.* Квадратный анализ деформации морского дна. //Украинский гидрометеорологический журнал. - 2010. - №6. – С. 225-233.
2. *Ломакин П. Д., Спиридонова Е. О., Чепыженко А. И., Чепыженко А. А.* Антропогенные и природные источники взвешенного вещества в водах Керченского пролива. //Морской экологический журнал.- 2008.– Т.6, №4. – С. 51-59.
3. *Ломакин П.Д., Панов Д.Б., Спиридонова Е.О.* Изменения важнейших составляющих экосистемы Керченского пролива после сооружения Тузлинской дамбы. - НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2008.-11с.
4. *Зенкович В.П.* Основы учения о развитии морских берегов. - М.: «Наука», 1962.- 71с
5. *Борисов В.И.* Главные реки Кубани.- М.: «Наука», 1978.- 61с
6. *Зенкович В.П.* Берега Черного и Азовского морей. - М.: «Наука», 1968.-163с.
7. *Шуйский Ю.Д., Выхованец Г.В., Хромов С.С., Муркалов А.Б., Голодов Н.Ф., Березницкая Н.А., Чернявская А.Н.* Морфология и динамика абразионных берегов Керченского пролива в пределах Украины. - Проблемы Черного моря. [www.ecologylife.ru](http://www.ecologylife.ru)
8. *Альтман Э.Н.* К вопросу об изменчивости расходов воды в Керченском проливе (по натурным наблюдениям). //Труды ГОИН, 1985, вып. 132. -С. 17-28.
9. *Илюшин В.Я.* Картографування донних ґрунтів мілководної морської акваторії. Проблеми і результати досліджень.//Украинский гидрометеорологический журнал. - 2012. - №10. – С. 216-229.
10. *Ломакин П.Д., Спиридонова Е.О., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А.* Антропогенные и природные источники взвешенных веществ в водах Керченского пролива.-Севастополь: НЦП, "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2008. -71 с.
11. *Илюшин В.Я.* Статистическая оценка бюджета наносов участка Керченской бухты и заносимость подходного канала Керченского Морского Торгового Порта. //Украинский гидрометеорологический журнал. - 2008. - №3. – С. 213-218.
12. *Тучковенко Ю.С., Илюшин В.Я., Коморин В.Н.* Моделирование транспорта наносов в Керченском проливе. //Метеорологія, кліматологія та гідрологія -2005. -49. –С. 446-459
13. *Шуйский Ю.Д., Выхованец Г.В., Хромов С.С., Муркалов А.Б., Голодов Н.Ф., Березницкая Н.А., Чернявская А.Н.* Морфология и динамика абразионных берегов Керченского пролива в пределах Украины.- Проблемы черного моря. [www.ecologylife.ru](http://www.ecologylife.ru)
14. *Башикиров Г.С.* Динамика прибрежной зоны моря. - М.: Химия, 1961.- 134с.

#### Характеристика джерел та механізмів утворення наносів в Керченській протоці.

**Полубок Т.М.**

*Розглянуто та проаналізовано джерела та механізми наносів в Керченській протоці. Наведено різноманітність наносів та їх особливості, вплив природних і людських факторів. Розкриті механізми утворення зважених наносів, охарактеризовані їх джерела. Визначена значимість річного стоку, хвиль і течій, вітрів і штормів, днопоглиблюючих робіт, а також антропогенних і природних факторів.*

**Ключові слова:** зважені наноси, твердий стік, осадонакопичення, замулювання

#### Description of sources and mechanisms of formation of alluviums is in the Kerch channel.

**Polubok T.M.**

*It was considered and analysed the sources and mechanisms of alluviums in the Kerch channel. A variety of alluviums and their feature, influence of natural and human factors, are brought. It is exposed mechanisms of formation of the self-weighted alluviums, their sources are described. It is meaningfulness of defined flow, waves and flow, winds and gales, dnedgiy works, and also anthropogenic and natural factors.*

**Keywords:** suspended sediments, hard flow, sedimenx acaimulation, silting-up.

PACS: 72.25.Pn, 75.30.Wx, 75.76.+j, 85.75.-d

Ю.А.Кругляк, д.х.н.

Одесский государственный экологический университет

### НАЧАЛА СПИНТРОНИКИ В КОНЦЕПЦИИ «СНИЗУ – ВВЕРХ»

*В рамках концепции «снизу – вверх» нанoeлектроники рассматриваются ключевые вопросы спинтроники – спиновый вентиль, граничное сопротивление при несовпадении мод проводимости, спиновые потенциалы и разность нелокальных спин-потенциалов, спиновый момент и его транспорт, уравнение Ландау – Лифшица – Гильберта, на его основе дается ответ на вопрос почему у магнита есть выделенная ось, обсуждаются обращение намагниченности спиновым током, поляризаторы и анализаторы спинового тока, а также рассматриваются уравнения диффузии для баллистического транспорта и токи в режиме неравновесных потенциалов.*

**Ключевые слова:** *нанofизика, нанoeлектроника, молекулярная электроника, снизу-вверх, спинтроника, спиновый вентиль, спиновый потенциал, спиновый момент, спиновый транспорт, спиновый ток, намагниченность, поляризатор, анализатор, уравнение диффузии, баллистический транспорт.*

**Введение.** В продолжение предыдущих публикаций [1, 2] в рамках концепции «снизу – вверх» нанoeлектроники [3] рассмотрим такие ключевые вопросы спинтроники как спиновый вентиль, граничное сопротивление при несовпадении мод проводимости, спиновые потенциалы и разность нелокальных спин-потенциалов, спиновый момент и его транспорт, уравнение Ландау – Лифшица – Гильберта, на его основе ответим на вопрос почему у магнита есть выделенная ось, рассмотрим обращение намагниченности спиновым током, поляризаторы и анализаторы спинового тока. Рассмотрим также уравнения диффузии для баллистического транспорта, токов в режиме неравновесных потенциалов и выведем формулу для сопротивления на границе контакта двух проводников с разным числом мод – вопросов, актуальных для спинтроники.

Электроника второй половины XX века основывалась на транспорте заряда электронов и управления им электрическими и магнитными полями (зарядовая электроника). В конце века началось бурное развитие нового направления, основанного на том, что электроны имеют не только электрический заряд, но и спин и связанный с ним магнитный момент. Это направление получило название спиновой электроники или спинтроники (*spin-transport electronics*).

Среди работ, предвосхитивших развитие спинтроники, отметим пионерские исследования М.И.Дьяконова и В.И.Переля, показавших возможность ориентации спинов при протекании тока [4], М.Жюльера по туннельному магнитосопротивлению [5], А.Г.Аронова и Г.Е.Пикуса по спиновой инжекции в полупроводниках [6]. И поныне, 40 лет спустя, исследования в области спинтроники ведутся в области этих трех открытых эффектов – инжекции в магнитных переходах носителей с определенным направлением спина, переключения таких переходов спин-поляризованным током и гигантского магнитосопротивления.

Началом современного этапа исследований в области спинтроники принято считать работы [7, 8], в которых было экспериментально показано, что электронный ток в ферромагнитном металле поляризован по спине и было открыто явление гигантского магнитосопротивления. Поляризация тока открыла возможность управления транспортом спинов в ферромагнитных структурах с помощью магнитных полей. В 2007 году Альберт Ферг и Петер Грюнберг были удостоены Нобелевской премии по физике за открытие гигантского магнитосопротивления.

Основным объектом исследований в спинтронике и поныне остается спиновый вентиль (*spin valve*). В простейшем случае он состоит из двух токонесящих ферромагнитных (ФМ)

контактов, разделенных достаточно тонким каналом транспорта электронов (спейсер / spacer). Спейсер может быть металлическим, но не магнитным, может быть диэлектриком, его роль могут играть отдельные молекулы, кластеры и любые наноразмерные структуры. Перенос электронов по спейсеру обычно баллистический или туннельный. Один из ферромагнитных контактов (он именуется свободным / free) характеризуется малой энергией анизотропии и легко меняет направление своей намагниченности под действием внешнего магнитного поля соответствующей ориентации. Другой ферромагнитный контакт (его называют закрепленным / pinned) характеризуется существенно большей энергией анизотропии и требует существенно более сильных полей для изменения своей намагниченности. Сильная анизотропия закрепленного контакта может быть природно присущей ему или же наведенной в процессе изготовления.

Для спинового вентиля характерна сильная зависимость электрического сопротивления спейсера при протекании тока между магнитными контактами от взаимной ориентации намагниченности контактов: при параллельной ориентации ( $P$ ) сопротивление значительно меньше, чем при антипараллельной ориентации ( $AP$ )

$$R_P < R_{AP}. \quad (1)$$

Поскольку ориентация намагниченности свободного ферромагнитного контакта может меняться под действием внешнего магнитного поля, то это приводит к сильной зависимости сопротивления проводника между контактами от приложенного магнитного поля.

Понять экспериментально наблюдаемое неравенство сопротивлений (1) качественно можно на основе двухканальной модели Мотта [9, 10], в которой перенос мажоритарных электронов (направление спина параллельно намагниченности) и миноритарных электронов (направление спина антипараллельно намагниченности) условно осуществляется по двум независимым спиновым подзонам (рис. 1) в условиях отсутствия спин-флип рассеяния (to flip – переворачивать), к рассмотрению которого вернемся позже. Электрон из определенной подзоны одного контакта может туннелировать только в такую же подзону другого контакта. Если намагниченность контактов параллельна, то вероятность такого туннелирования будет намного больше, а электрическое сопротивление будет соответственно меньше, чем в случае антипараллельной намагниченности контактов [11]. Рассмотрим ситуацию подробнее.

Количественную оценку неравенства (1) можно получить в модели, согласно которой спиновая подзона имеет различное граничное сопротивление с контактом в зависимости от того, речь идет о переносе спинов параллельных (мажоритарных спинов) или антипараллельных (миноритарных спинов) намагниченности контактов. Граничное сопротивление для мажоритарных спинов меньше, чем для миноритарных ( $r < R$ ). Соответствующие эквивалентные схемы сопротивления показаны на рис. 1. Полноты ради, учтено также сопротивление каналов подзон  $R_{ch}$ .

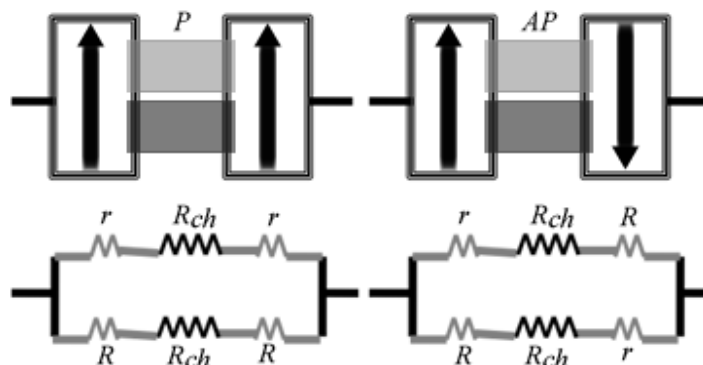


Рис. 1 – Параллельная и антипараллельная ориентации намагниченности контактов спинового вентиля и соответствующие эквивалентные схемы сопротивления для мажоритарных (слева) и миноритарных (справа) носителей заряда. Канал транспорта электронов условно разбит на две спиновых подзоны – для электронов со спином «вверх» ( $up$ ) подзона закрашена светлосерым, а со спином «вниз» ( $dn$ ) – темносерым цветом.

Из элементарной теории электрических цепей следует, что для параллельной ориентации намагниченности контактов

$$R_p = \left( \frac{1}{2r + R_{ch}} + \frac{1}{2R + R_{ch}} \right)^{-1} = \frac{(2r + R_{ch})(2R + R_{ch})}{2(R + r + R_{ch})}, \quad (2)$$

а для антипараллельной ориентации

$$R_{AP} = \frac{r + R + R_{ch}}{2}. \quad (3)$$

Качество спинового вентиля определяется различием между  $R_p$  и  $R_{AP}$ . Можно ожидать, что качество вентиля будет выше, если сопротивлением канала можно пренебречь ( $R_{ch} \ll r, R$ ), так что качество вентиля определяется лишь граничными сопротивлениями. Тогда

$$R_p = \frac{2rR}{r + R} \quad (4)$$

и

$$R_{AP} = \frac{r + R}{2}, \quad (5)$$

откуда сразу следует неравенство (1), стоит лишь в (4) и (5) большее сопротивление  $R$  устремить к бесконечности.

В пределе  $R_{ch} \rightarrow 0$  получим максимально возможное значение магнитосопротивления (МС)

$$MR \equiv \frac{R_{AP} - R_p}{R_p} = \frac{R_{AP}}{R_p} - 1 = \frac{(r + R)^2}{4rR} = \frac{\left(\frac{R-r}{R+r}\right)^2}{1 - \left(\frac{R-r}{R+r}\right)^2}, \quad (6)$$

если  $R_{ch} = 0$ .

Поляризация ФМ контакта определяется как

$$P \equiv \frac{R - r}{R + r} \quad (7)$$

и является мерой его эффективности, так что магнитосопротивление

$$MR = \frac{P^2}{1 - P^2}, \quad (8)$$

если  $R_{ch} = 0$ .

Зависимость МС от сопротивления канала  $R_{ch}$  показана на рис. 2. Обращает на себя внимание быстрое зануление МС с ростом нормированного сопротивления канала, начиная, скажем, со значения, равного пяти.

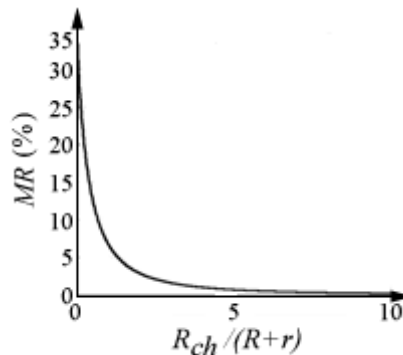


Рис. 2 – Падение МС с ростом нормированного сопротивления канала при поляризации  $P = 0.5$ .

Выражение (8) для МС справедливо для металлических немагнитных проводников. В этом случае сопротивление двух последовательно соединенных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  равно сумме этих сопротивлений  $R_1 + R_2$ . Если же проводником является диэлектрик, то имеет место магнитный туннельный переход (МТП), а сопротивление двух последовательно соединенных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  пропорционально произведению этих сопротивлений  $KR_1 \cdot R_2$ , что следует из физики туннельных проводников, так что для параллельной Р ориентации намагниченностей контактов имеем

$$R_P = \frac{Kr^2 R^2}{r^2 + R^2}, \quad (9)$$

а для антипараллельной АР

$$R_{AP} = \frac{KrR}{2}, \quad (10)$$

так что

$$\frac{R_{AP}}{R_P} = \frac{r^2 + R^2}{2rR} = \frac{(R+r)^2 + (R-r)^2}{(R+r)^2 - (R-r)^2} = \frac{1+P^2}{1-P^2}, \quad (11)$$

а магнитосопротивление МТП

$$MR = \frac{2P^2}{1-P^2} \quad (12)$$

отличается двойкой от МС металлического проводника (8).

**Граничное сопротивление и несовпадение мод проводимости.** Поначалу в спиновых вентилях использовались металлические спейсеры, например, медные. Оказалось, однако, что во многих приложениях лучше себя показывают непроводящие оксиды в режиме МТП, обеспечивая более высокие значения МС. Попытки использовать полупроводниковые спейсеры были неудачными приблизительно до 2000 года, когда стало ясно, что причина неудач кроется в высоких значениях  $R_{ch}$  сравнительно с суммой  $(r + R)$ , приводящих к низким значениям МС [12, 13]. Выход был найден в увеличении граничных сопротивлений за счет дополнительных барьерных слоев на границах с контактами (рис. 3). Сейчас это стандартная процедура при работе с полупроводниковыми каналами. Как же это работает?

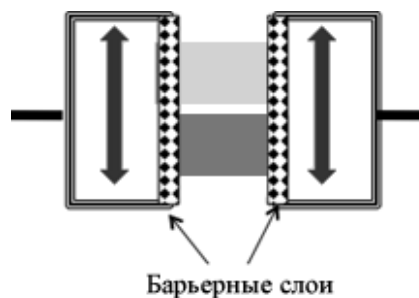


Рис. 3 – Дополнительные барьерные слои с целью увеличить граничные сопротивления при инжекции спинов в полупроводниковый канал проводимости.

Стандартное объяснение очевидно. Барьерные слои увеличивают граничные сопротивления  $r$  и  $R$ , уменьшая тем самым отношение  $R_{ch} / (r + R)$  и увеличивая МС (рис. 2). Однако, если бы дело было только в этом, то можно было бы уменьшить толщину спейсера настолько, чтобы перейти в баллистический режим транспорта ( $L \ll \lambda$ ). Эта идея не нашла, однако, экспериментального подтверждения.

Число мод  $M(E)$  или же плотность состояний  $D(E)$  в обычном канале проводимости и в спейсере спинового клапана схематически показаны на рис. 4. В обычном канале обе спиновые подзоны одинаковы. В спиновом же вентиле полоса миноритарных спинов обычно сдвинута вверх по энергии, в результате чего число мод в районе  $E = \mu_0$  меньше для миноритарных спинов ( $M_{dn}$ ), чем для мажоритарных ( $M_{up}$ ). Чему будут равны граничные сопротивления?

Забегая вперед, далее будет показано (Приложение 2), что сопротивление  $R_{int}$  на границе контакта двух проводников с разным числом мод ( $M_1 > M_2$ )

$$R_{int} = \frac{h}{2q^2} \left( \frac{1}{M_2} - \frac{1}{M_1} \right). \quad (13)$$

Если  $M_1 \gg M_2$ , то

$$R_{int} = \frac{h}{2q^2 M_2}, \quad (14)$$

что отвечает «хорошему контакту» ( $M_1 > M_2$ ).

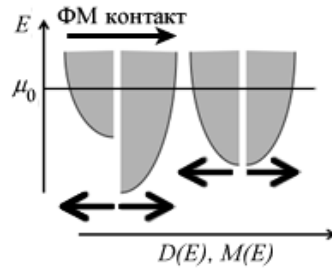


Рис. 4 – Спиновые подзоны в обычном канале проводимости (справа) и в спиновом вентиле (слева).

Число мод  $M$  в канале металлического проводника обычно имеет промежуточное значение (рис. 5), в идеале же

$$M_{up} \gg M \gg M_{dn}, \quad (15)$$

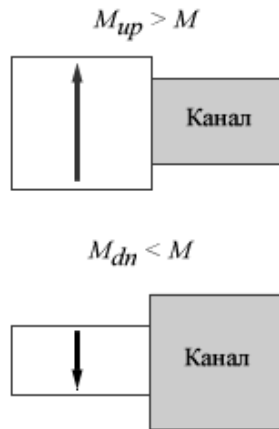


Рис. 5 – Металлический спейсер между двумя ФМ контактами.

так что ФМ контакт «хорош» для мажоритарных спинов, но не для миноритарных:

$$r = \frac{h}{2q^2} \left( \frac{1}{M} - \frac{1}{M_{up}} \right) \approx \frac{h}{2q^2 M} \quad (16)$$

$$R = \frac{h}{2q^2} \left( \frac{1}{M_{dn}} - \frac{1}{M} \right) \approx \frac{h}{2q^2 M_{dn}}$$

Число же мод  $M$  в полупроводящем канале (рис. 6) обычно меньше числа мод в обоих ФМ контактах

$$M_{up} > M_{dn} \gg M, \quad (17)$$

так что

$$r = R = \frac{h}{q^2 M} \quad (18)$$

и поляризация  $P$  нулевая.

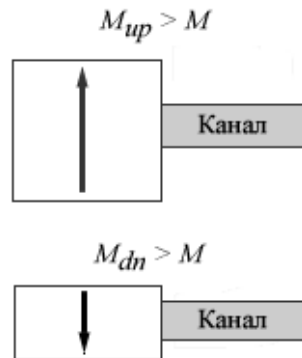


Рис. 6 – Полупроводящий спейсер между двумя ФМ контактами.

Другими словами, проблема инжекции спинов в полупроводящий канал не только вызвана высоким сопротивлением канала  $R_{ch}$ , которое можно было бы уменьшить в режиме баллистического транспорта, но и тем, что теряется различие между граничными сопротивлениями  $R$  и  $r$  для обоих спинов. Скажем, если канал имеет 10 мод проводимости, то ему безразлично имеет ли ФМ контакт 100 мод (миноритарные спины) или 1000 мод (мажоритарные спины). И в том и в другом случае недостатка электронов в канале не будет.

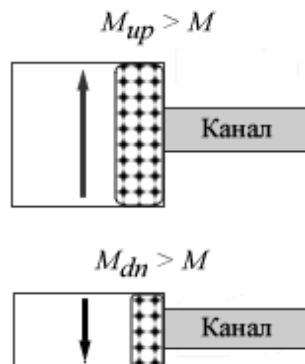


Рис. 7 – Барьеры на границе ФМ контактов и канала проводимости.

При наличии барьеров на границе ФМ контакта и полупроводящего канала (рис. 7) граничное сопротивление уже не дается формулой (13), а полагают, что оно пропорционально произведению плотности состояний, а стало быть и числа мод на обеих сторонах туннельного барьера так что

$$r = K \cdot M_{up} M, R = K \cdot M_{dn} M \quad (19)$$

с константой пропорциональности  $K$ . Теперь поляризация  $P$  не зависит от числа мод в канале

$$P = \frac{M_{up} - M_{dn}}{M_{up} + M_{dn}} \quad (20)$$

и ей можно придать нужное численное значение. Граничные сопротивления теперь, конечно, больше по сравнению с омическим сопротивлением (13).

Осталось объяснить происхождение формулы (13) для граничного сопротивления  $R_{int}$ . Для этого, однако, нам нужно рассмотреть диффузионное уравнение для баллистического транспорта (Приложение 1), а затем, опираясь на результаты в Приложении 1, вывести формулу для граничного сопротивления (Приложение 2).

**Спиновые потенциалы.** Различие в граничном сопротивлении между магнитным контактом и спиновыми подзвонами для спинов вверх ( $up$ ) и вниз ( $dn$ ) позволяет ввести

понятие о спиновых потенциалах  $\mu_{up}$  и  $\mu_{dn}$  внутри немагнитного проводника. Различие между ними вначале было экспериментально обнаружено на металлах, а затем и на полупроводниках.

Концепцию спинового потенциала продемонстрируем на простой структуре с одним магнитным контактом (рис. 8а). Если не учитывать спины, профиль электрохимического потенциала качественно выглядел бы как на рис. 8б. Количественное решение дают уравнения диффузии (A1.1) и непрерывности (A1.10) с соответствующими граничными условиями для  $\mu(z)$  на контактах (Приложение 1). Поскольку граничные сопротивления между магнитным контактом и спиновыми подзонами проводника различны, следует ожидать различное падение электрохимических потенциалов на границе между контактом и спиновыми подзонами, и при решении соответствующих уравнений диффузии профили электрохимических потенциалов для спинов  $up$  и  $dn$  будут различны, как это качественно показано на рис. 8в.

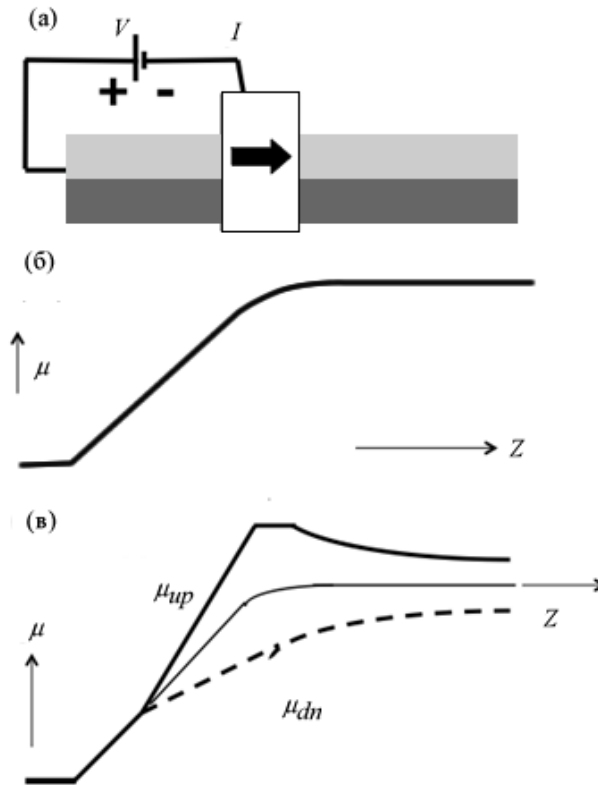


Рис. 8 – Сепарирование спиновых потенциалов  $\mu_{up}$  и  $\mu_{dn}$  в канале с использованием магнитного контакта (качественная картина).

Электрохимические потенциалы для двух спинов сепарируются на магнитном контакте, однако, затем стремятся вернуться к исходному значению в результате спин-флип-релаксации, которая непрерывно стремится восстановить локальное равновесие путем уравнивания  $\mu_{up}$  и  $\mu_{dn}$ . Количественно поведение спиновых потенциалов дается уравнениями диффузии для спинов  $up$  и  $dn$

$$I_{up} = -\frac{\sigma A}{2q} \frac{d\mu_{up}}{dz},$$

$$I_{dn} = -\frac{\sigma A}{2q} \frac{d\mu_{dn}}{dz},$$
(21)

в которых для каждого из спинов учитывается половина проводимости по сравнению с уравнением для суммарного тока (A1.1).

Спин-флип-релаксация обращает ток  $I_{up}$  в ток  $I_{dn}$  и наоборот, так что



$$\frac{dI_{up}}{dz} = -\frac{dI_{dn}}{dz} = -K(\mu_{up} - \mu_{dn}), \quad (22)$$

где константа пропорциональности  $K$  есть мера эффективности спин-флип-релаксации, стремящейся уравнивать спиновые потенциалы  $\mu_{up}$  и  $\mu_{dn}$ .

Комбинируя (22) и (21), имеем

$$\frac{d^2\mu_{up}}{dz^2} = \frac{\mu_{up} - \mu_{dn}}{2\lambda_{sf}^2} = -\frac{d^2\mu_{dn}}{dz^2}, \quad (23)$$

где длина

$$\lambda_{sf} = \frac{1}{2}\sqrt{\sigma A / qK} \quad (24)$$

есть характеристическое расстояние, на котором электрон меняет свой спин на противоположный. Характерные значения длины спин-флипа меняются в широких пределах от нескольких десятков нанометров до сотен микрометров в зависимости от среды и температуры.

Уравнение (23) известно как уравнение Вале – Ферта [13]. Изначально оно было получено как следствие транспортного уравнения Больцмана [14, 15] и ныне широко используется при обсуждении диффузионных задач с учетом спина электронов.

Введем понятия зарядового и спинового потенциалов

$$\mu \equiv (\mu_{up} + \mu_{dn}) / 2, \quad (25)$$

$$\mu_s \equiv \mu_{up} - \mu_{dn} \quad (26)$$

и аналогично – зарядового и спинового токов

$$I = I_{up} + I_{dn}, \quad (27)$$

$$I_s = I_{up} - I_{dn}. \quad (28)$$

Зарядовые потенциалы и токи удовлетворяют обычным диффузионным уравнениям (A1.1) и (A1.10), а спиновый потенциал определяется длиной спин-флипа

$$\frac{d^2\mu_s}{dz^2} = \frac{\mu_s}{\lambda_{sf}^2}. \quad (29)$$

Можно ли измерить спиновую разность потенциалов внутри канала проводимости? Можно, и не только в пределах канала проводимости, но и за его пределами, как показано на рис. 9. Подобные измерения известны как измерения разности нелокальных спин-потенциалов и сейчас являются рутинными при исследовании спин-транспортных задач [19].

Спиновая разность потенциалов  $V_S \equiv (\mu_P - \mu_{AP})/q$  измеряется при изменении намагниченности пробного электрода за пределами проводника (рис. 9) с параллельного режима  $P$  на антипараллельный  $AP$  и как будет далее показано равна

$$V_S \equiv \frac{\mu_P - \mu_{AP}}{q} = P_1 P_2 I R_S e^{-L/\lambda_{sf}}, \quad (30)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – поляризации инжектирующего и детектирующего ФМ контактов (рис. 9), а спиновое сопротивление

$$R_S = \lambda_{sf} / \sigma A. \quad (31)$$

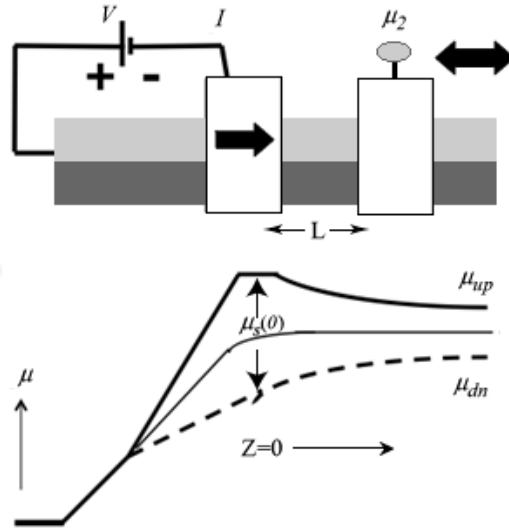


Рис. 9 – К измерению спиновой разности потенциалов за пределами проводника тока.

**Разность нелокальных спин-потенциалов.** Уравнение (30) можно получить в два шага. Сначала покажем, что спиновый потенциал инжектирующего контакта

$$\mu_s(0) = P_1 q I R_s. \quad (32)$$

Затем покажем, что разность

$$\mu_p - \mu_{AP} = P_2 \mu_s(0) e^{-L/\lambda_{sf}}, \quad (33)$$

откуда сразу получается уравнение (30).

Поведение спиновых потенциалов описывается уравнением (29), согласно которому спиновый потенциал уменьшается экспоненциально в обе стороны от инжектирующего контакта

$$\mu_s = \mu_s(0) e^{-|z|/\lambda_{sf}}, \quad (34)$$

как это показано на рис. 10.

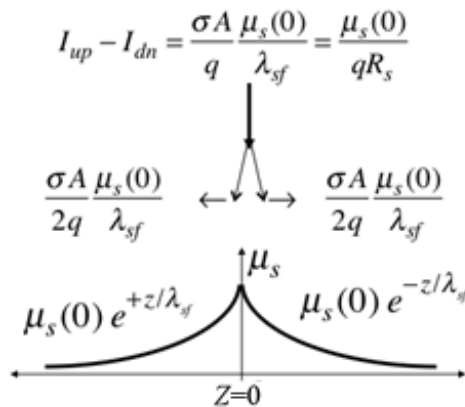


Рис. 10 – К расчету суммарного спинового тока, порождаемого инжектирующим контактом на рис. 9.

Теперь вычислим спиновый ток в обоих направлениях от инжектирующего контакта

$$I_s = -\frac{\sigma A}{2q} \frac{d\mu_s}{dz}, \quad (35)$$

выражение для которого следует из (21) и (25) – (28). Сами токи в обоих направлениях показаны на рис. 10. Их сумма с учетом спинового сопротивления (31) дает суммарный спиновый ток

$$I_{up} - I_{dn} = \frac{\mu_s(0)}{qR_s}. \quad (36)$$

Теперь рассмотрим ток от инжектирующего контакта через его граничные проводимости  $g_{up}$  и  $g_{dn}$  для спинов  $up$  и  $dn$  (рис. 11). Из теории электрических цепей имеем

$$\frac{\mu_s(0)}{q} \equiv \frac{\mu_{up} - \mu_{dn}}{q} = \frac{I_{dn}}{g_{dn}} - \frac{I_{up}}{g_{up}}, \quad (37)$$

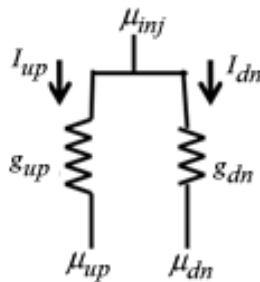


Рис. 11 – К вычислению токов от инжектирующего контакта через его граничные проводимости  $g_{up}$  и  $g_{dn}$  для спинов  $up$  и  $dn$ .

что можно переписать в виде

$$\frac{\mu_s(0)}{q} = \frac{g_{up} + g_{dn}}{2g_{up}g_{dn}} \left( P_1 I - (I_{up} - I_{dn}) \right) \quad (38)$$

через поляризацию инжектирующего контакта

$$P_1 \equiv \frac{g_{up} - g_{dn}}{g_{up} + g_{dn}}, \quad (39)$$

а с использованием (36) имеем

$$(I_{up} - I_{dn}) R_s = \frac{g_{up} + g_{dn}}{2g_{up}g_{dn}} \left( P_1 I - (I_{up} - I_{dn}) \right) \quad (40)$$

или иначе

$$\frac{P_1 I}{I_{up} - I_{dn}} - 1 = \frac{2R_s}{\frac{1}{g_{up}} + \frac{1}{g_{dn}}}. \quad (41)$$

Спиновое сопротивление  $R_s$  (31) есть сопротивление той части канала проводимости, длина которой соответствует спин-флип-длине  $\lambda_{sf}$ , и оно намного меньше чем граничные сопротивления  $1/g_{up}$  и  $1/g_{dn}$  (рис. 11), которые особенно велики при использовании барьеров для усиления поляризации контакта. В этих условиях правая часть равенства (41) зануляется, так что окончательно

$$I_{up} - I_{dn} = P_1 I, \quad (42)$$

что вместе с (40) окончательно дает искомое выражение (32).

Для получения на втором шаге выражения (33) начинаем со спинового потенциала на детектирующем контакте (рис. 9)

$$\mu_s(L) = \mu_s(0) e^{-L/\lambda_{sf}}. \quad (43)$$

Для нахождения потенциала, регистрируемого детектирующим контактом, воспользуемся цепью на рис. 12, аналогичной использованной для инжектирующего контакта на рис. 11.

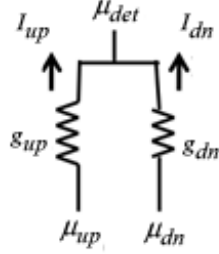


Рис. 12 – К вычислению токов на детектирующем контакте через его граничные проводимости  $g_{up}$  и  $g_{dn}$  для спинов  $up$  и  $dn$ .

Поскольку суммарный ток на детектирующем контакте равен нулю, то для цепи на рис. 12 при параллельной ориентации намагниченности контакта имеем

$$I = 0 = g_{up}(\mu_{up} - \mu_p) + g_{dn}(\mu_{dn} - \mu_p), \quad (44)$$

так что

$$\mu_p = \frac{g_{up}\mu_{up} + g_{dn}\mu_{dn}}{g_{up} + g_{dn}}. \quad (45)$$

В случае же антипараллельной ориентации в числителе появляются перекрестные произведения

$$\mu_{AP} = \frac{g_{dn}\mu_{up} + g_{up}\mu_{dn}}{g_{up} + g_{dn}}. \quad (46)$$

Итак,

$$\mu_p - \mu_{AP} = \frac{(g_{up} - g_{dn})(\mu_{up} - \mu_{dn})}{g_{up} + g_{dn}} = P_2 \mu_s(L), \quad (47)$$

где поляризация детектирующего контакта  $P_2$  определяется через граничные проводимости точно так же, как и поляризация инжектирующего контакта (39).

Из (47) и (43) получаем искомое уравнение (33). Это же уравнение можно получить несколько иначе.

Перепишем (44) в общем виде

$$I = 0 = g_{up}(\mu_{up} - \mu_{det}) + g_{dn}(\mu_{dn} - \mu_{det}) \quad (48)$$

так что

$$\mu_{det} = \frac{g_{up}\mu_{up} + g_{dn}\mu_{dn}}{g_{up} + g_{dn}}. \quad (49)$$

Используя уравнения (25) и (26), перепишем  $\mu_{up}$  и  $\mu_{dn}$  через  $\mu$  и  $\mu_s$

$$\begin{aligned} \mu_{up} &= \mu + \frac{\mu_s}{2}, \\ \mu_{dn} &= \mu - \frac{\mu_s}{2}, \end{aligned} \quad (50)$$

так что для параллельной ориентации намагниченности детектирующего контакта

$$\mu_p = \mu + \frac{P_2 \mu_s}{2}, \quad (51)$$

а для антипараллельной ориентации

$$\mu_{AP} = \mu - \frac{P_2 \mu_s}{2}, \quad (52)$$

где поляризация  $P_2$  определена выше. Таким образом, мы снова пришли к уравнению (47)

$$\mu_P - \mu_{AP} = P_2 \mu_s (L). \quad (53)$$

**Спиновый момент.** Спиновый вентиль и многочисленные различные устройства электроники на его основе явились наиболее значительным достижением спинтроники [11, 20 – 22]. Другим удивительным достижением явилось экспериментальное обнаружение транспорта спинового момента [23 – 25], предложенного в [26, 27] и которое заключается в том, что спиновые токи могут менять намагниченность наноконтакта [28 – 30].

Схема эксперимента по транспорту спинового момента показана на рис. 13. Намагниченность закрепленного левого контакта спинового вентиля фиксирована и направлена вниз. Правый нанокontakt свободен и его намагниченность может изменять свое направление. Подача отрицательного потенциала на закрепленный контакт порождает отрицательный спиновый потенциал

$$\mu_s \equiv \mu_{up} - \mu_{dn} < 0, \quad (54)$$

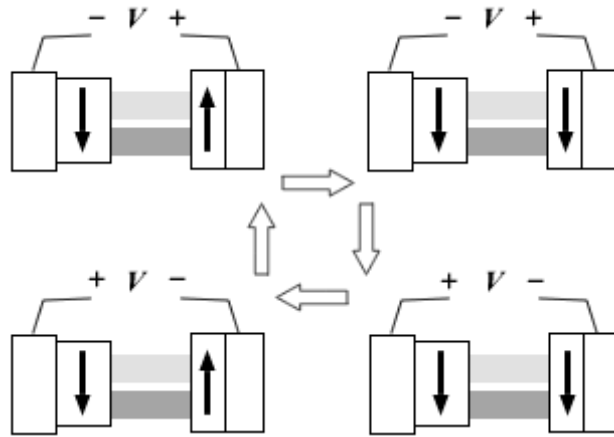


Рис. 13 – Демонстрация эксперимента по транспорту спинового момента.

который вызывает перенос спинового момента на нанокontakt и, если спиновый потенциал достаточно большой, то намагниченность свободного контакта меняется с направления «вверх» на направление «вниз». Если теперь поменять полярность разности потенциалов, подаваемой на вентиль, то появление положительного потенциала на закрепленном контакте вытягивает из канала электроны со спиной «вниз» и таким образом меняет знак спинового потенциала на обратный

$$\mu_s \equiv \mu_{up} - \mu_{dn} > 0 \quad (55)$$

Опять же, если положительный спиновый потенциал достаточно большой, то он вернет намагниченность наноконтакта в исходное состояние. Этот эффект надежно экспериментально подтвержден, и представляется весьма вероятным, что он будет вскоре использоваться для записи информации на ФМ наноноситель так же, как явление магнитосопротивления сейчас широко используется для считывания информации, например, с жесткого диска.

**Уравнение Ландау – Лифшица – Гильберта.** Эти два экспериментальных достижения – магнитное генерирование избытка спинов одного сорта и обращение намагниченности образца за счет этого избытка фактически объединили спинтронику с магнетроникой (рис. 14) в единую область исследований, в которой намагничивание и спиновый транспорт играют равновеликие роли. Модель, описывающая динамику перемагничивания наноманнитных структур под

действием спинового тока, основана на уравнении Ландау – Лифшица – Гильберта (ЛЛГ) [31 – 34].

Магнитный момент электрона пропорционален магнетону Бора

$$\mu_{el} = \frac{g_s}{2} \mu_B, \quad (56)$$

$$\mu_B \equiv \frac{q\hbar}{2m} = 9.274 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2, \quad (57)$$

где g-фактор  $g_s$  для спина электрона в вакууме очень близок к 2 (точнее равен 2.002329), но может существенно отличаться от 2 для электронов в твердых телах, что для нас сейчас не существенно, так что будем считать, что  $g_s = 2$ , а  $\mu_{el} = \mu_B$ . Из (57) видно, что магнитный момент в один магнетон Бора создается током в приблизительно  $10 \mu\text{А}$ , циркулирующему по квадратному контуру со стороной в 1 нм.



Рис. 14 – Спиновый транспорт и динамика перемагничивания наномagnитов тесно связаны.

В немагнитных телах все спины скомпенсированы. В магнитных телах величина намагниченности пропорциональна числу нескомпенсированных спинов  $N_s$  в объеме  $\Omega$

$$M_s = \mu_B \frac{N_s}{\Omega}, \quad (58)$$

а направление вектора намагниченности, задаваемое его единичным вектором  $\hat{m}$ , меняется с магнитным полем  $\vec{H}$  согласно уравнению ЛЛГ

$$(1 + \alpha^2) \frac{d\hat{m}}{dt} = -\gamma\mu_0 (\hat{m} \times \vec{H}) - \alpha\gamma\mu_0 (\hat{m} \times \hat{m} \times \vec{H}), \quad (59)$$

где гиромангнитное отношение, как отношение заряда электрона к его массе,

$$\gamma \equiv \frac{q}{m} = \frac{2\mu_B}{\hbar}, \quad (60)$$

а магнитная постоянная  $\mu_0 = 1/(\epsilon_0 \cdot c^2)$  связана с электрической постоянной  $\epsilon_0$  через скорость света  $c$ .

В уравнении ЛЛГ (59) первое слагаемое описывает динамику намагниченности [32], а второе слагаемое – диссипацию динамического процесса с параметром затухания Гильберта  $\alpha$  [33], характерное значение которого обычно  $\sim 0.01$ .

**Почему у магнита есть выделенная ось?** Воспользуемся уравнением ЛЛГ для понимания фундаментального экспериментального факта о наличии у магнита выделенной оси

(пусть это будет ось  $z$ ). Внешнее магнитное поле  $H_{ext}$ , если оно превышает некоторое критическое значение  $H_K$ , может быть использовано для изменения намагниченности между значениями  $m_z = -1$  и  $m_z = +1$  (рис. 15).

С магнитным полем, направленным вдоль оси  $z$ ,

$$\vec{H} = H \hat{z} \quad (61)$$

и пренебрегая  $\alpha^2 \ll 1$ , уравнение ЛЛГ упрощается до

$$\frac{d\hat{m}}{dt} = -\gamma\mu_0 H (\hat{m} \times \hat{z}) - \alpha\gamma\mu_0 H (\hat{m} \times \hat{m} \times \hat{z}). \quad (62)$$

Выполнив векторные произведения

$$\hat{m} \times \hat{z} = m_z, \quad (\hat{m} \times \hat{z}) \cdot \hat{z} = 0, \quad -\hat{z} \cdot (\hat{m} \times \hat{m} \times \hat{z}) = 1 - m_z^2, \quad (63)$$

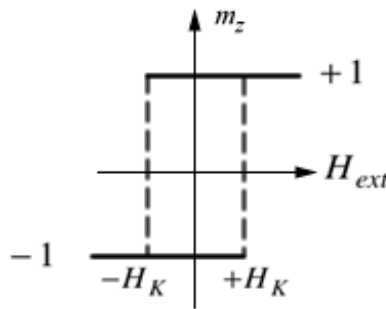


Рис. 15 – Магнит имеет выделенную ось (пусть ось  $z$ ). Внешнее магнитное поле  $H_{ext}$ , если оно превышает некоторое критическое значение  $H_K$ , меняет намагниченность между значениями  $m_z = -1$  и  $m_z = +1$ .

получим

$$\frac{dm_z}{dt} = (1 - m_z^2) \alpha\gamma\mu_0 H. \quad (64)$$

Равновесное состояние требует

$$\frac{dm_z}{dt} = 0, \quad (65)$$

так что единичный вектор намагниченности может принимать только два значения

$$m_z = -1 \text{ и } m_z = +1, \quad (66)$$

что и служит ответом на поставленный выше вопрос о наличии у магнита выделенной оси.

Остается вопрос о стабильности решения уравнения (65). Пусть

$$m_z = +1 - \delta. \quad (67)$$

Тогда вместо (64) имеем

$$-\frac{d\delta}{dt} \approx (2\alpha\gamma\mu_0 H) \delta, \quad (68)$$

что означает невозможность отклонения  $m_z$  от  $+1$  при положительном значении магнитного поля  $H$ . Аналогично, при

$$m_z = -1 + \delta \quad (69)$$

равенство

$$\frac{d\delta}{dt} \approx (2\alpha\gamma\mu_0 H) \delta \quad (70)$$

свидетельствует о невозможности отклонения  $m_z$  от  $-1$  при отрицательном значении магнитного поля. Иначе говоря,

$$m_z = +1 \text{ устойчиво при } H > 0, \quad (71)$$

$$m_z = -1 \text{ устойчиво при } H < 0. \quad (72)$$

Теперь вернемся к рис. 15. Мы до сих пор не конкретизировали магнитное поле  $H$ . Оно включает в себя внешнее магнитное поле  $H_{ext}$  и внутреннее магнитное поле, которое каждый электрон чувствует со стороны всех остальных электронов со знаком, определяемым значением  $m_z$ ,

$$H = H_{ext} + H_K m_z. \quad (73)$$

Теперь из условий устойчивости (71) и (72) следует

$$m_z = +1 \text{ устойчиво при } H_{ext} > -H_K, \quad (74)$$

$$m_z = -1 \text{ устойчиво при } H_{ext} < +H_K. \quad (75)$$

что и показано графически на рис. 15.

**Обращение намагниченности спиновым током.** Для обсуждения динамики намагничивания в уравнение ЛЛГ (59) добавим еще одно слагаемое ( $\alpha^2 \ll 1$ )

$$\frac{d\hat{m}}{dt} = -\gamma\mu_0 (\hat{m} \times \vec{H}) - \alpha\gamma\mu_0 (\hat{m} \times \hat{m} \times \vec{H}) - \left( \hat{m} \times \hat{m} \times \frac{\vec{I}_s}{qN_s} \right), \quad (76)$$

пропорциональное спиновому току  $\vec{I}_s$  в пересчете на один спин, где  $N_s$  есть число спинов, обеспечивающих намагниченность. Почему дополнительный член берется в виде двойного векторного произведения

$$\hat{m} \times \hat{m} \times \frac{\vec{I}_s}{qN_s}, \quad (77)$$

а не просто

$$\frac{\vec{I}_s}{qN_s} ? \quad (78)$$

Двойное векторное произведение  $\hat{m} \times \hat{m} \times \frac{\vec{I}_s}{qN_s}$  с произвольным вектором  $\vec{V}$  (рис.

16) сводится к вычитанию из вектора  $\vec{V}$  компоненты этого вектора вдоль единичного вектора  $\hat{m}$

$$-\hat{m} \times \hat{m} \times \vec{V} = \vec{V} - (\hat{m} \cdot \vec{V}) \hat{m}. \quad (79)$$

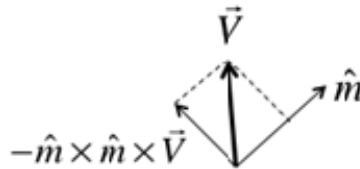


Рис. 16 – К вычислению двойного векторного произведения.

Поэтому член  $\hat{m} \times \hat{m} \times \frac{\vec{I}_s}{qN_s}$  равен компоненте вектора спинового тока  $\frac{\vec{I}_s}{qN_s}$ ,

перпендикулярной намагниченности, величина же намагниченности не изменяется, обращается только ее направление. Это гарантируется тем, что вся правая часть уравнения ЛЛГ должна



быть перпендикулярна намагниченности. Есть еще один дополнительный член в правой части уравнения ЛЛГ, также перпендикулярный намагниченности

$$\alpha \hat{m} \times \frac{\vec{I}_s}{qN_s}, \quad (80)$$

но мы им пренебрегли, поскольку параметр затухания Гильберта  $\alpha$  обычно очень мал.

Проектируя уравнение ЛЛГ (76) на выделенную ось, получим

$$\frac{dm_z}{dt} = (1 - m_z^2) \left( \alpha \gamma \mu_0 H_K m_z + \frac{I_s}{qN_s} \right). \quad (81)$$

Как и в случае с уравнением (64), критическое значение спинового тока, необходимое для обращения намагниченности дается уравнением

$$\left( \frac{I_s}{qN_s} \right)_{crit} = \alpha \gamma \mu_0 H_K, \quad (82)$$

а с использованием (58) для критического значения спинового тока имеем

$$(I_s)_{crit} = \frac{4q\alpha}{\hbar} \left( \frac{1}{2} \mu_0 H_K M_s \Omega \right). \quad (83)$$

Величина в круглых скобках для критического тока есть энергия барьера, разделяющего два состояния магнита. Для устойчивого состояния магнита с той или иной намагниченностью (вверх или вниз) барьер должен быть не меньше нескольких десятков  $kT$ . В противном случае намагниченность магнита будет обращаться циклически практически бесконечно долго. При барьере  $\sim 40 kT$  и  $\alpha = 0.01$  уравнение (83) для критического значения спинового тока дает  $\sim 10 \mu A$ . Экспериментально наблюдались токи  $\sim 50 - 100 \mu A$ .

Наглядные апплеты по динамике намагничивания с переносом спинового момента выставлены на сайте [35].

**Поляризаторы и анализаторы спинового тока.** Пусть регистрирующий ФМ контакт 2 расположен под углом по отношению к инжектирующему контакту (рис. 17). Какая разность потенциалов будет измерена? Ответ представляется довольно простым:

$$\mu_2 = \mu + \frac{\vec{P}_2 \cdot \vec{\mu}_s}{2}, \quad (84)$$

где вектор поляризации совпадает с направлением регистрирующего контакта, а вектор спинового потенциала совпадает с направлением спиновой поляризации канала проводимости, которое по договоренности есть направление намагниченности инжектирующего контакта. Ранее мы уже рассматривали два частных случая взаимной ориентации намагниченности контактов: параллельно  $P$  и антипараллельно  $AP$  (53). Как интерпретировать более общий результат (84) ?

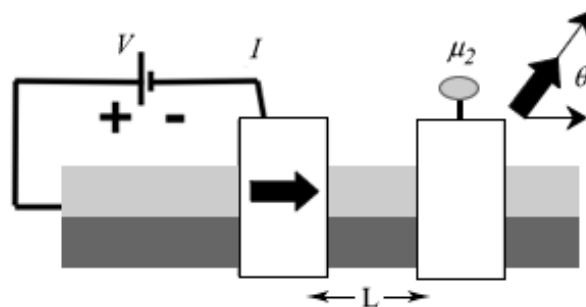


Рис. 17 – Регистрирующий контакт 2 в роли анализатора спинового тока.

Проведем аналогию с поляризацией потока фотонов. Интенсивность света, прошедшего через анализатор, пропорциональна квадрату косинуса угла между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора  $I/I_0 = \cos^2\theta$  (закон Малюса). Интенсивность прошедшего света максимальна при совпадении плоскостей пропускания поляризатора и анализатора ( $\theta = 0^\circ$ ) и минимальна, когда плоскости перпендикулярны ( $\theta = 90^\circ$ ). Иная ситуация с потоком электронов.

Пусть все электроны в потоке имеют спин «вверх». Тогда по определению (25) и (26)

$$\mu_s = \mu_{up} = 2\mu, \quad (85)$$

если же повернуть намагниченность на регистрирующем контакте на угол  $\theta$ , измеряемая разность потенциалов, как следует из (84), изменится на

$$\frac{\mu_2}{\mu} = 1 + P_2 \cos \theta. \quad (86)$$

Как и в случае потока фотонов, разность потенциалов максимальна, когда регистрирующий и инжектирующий контакты параллельны ( $\theta = 0$ ). Если же в случае потока фотонов интенсивность прошедшего через анализатор света минимальна при  $\theta = 90^\circ$ , то в случае потока электронов минимум разности потенциалов достигается при антипараллельной ( $\theta = 180^\circ$ ) ориентации намагниченности контактов (рис. 18).

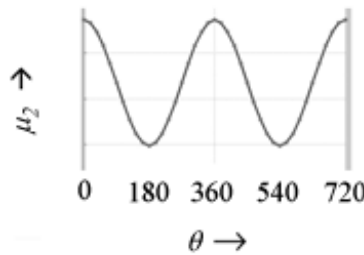


Рис. 18 – Колебания нелокального спинового потенциала в зависимости от угла между инжектирующим и регистрирующим ФМ контактами.

В предположении идеального регистрирующего контакта ( $P_2 = 1$ ) из (86) следует

$$\frac{\mu_2}{\mu} = 1 + \cos \theta = 2 \cos^2 \frac{\theta}{2}, \quad (87)$$

так что если анализатор фотонов пропускает через себя количество фотонов, пропорциональное  $\cos^2\theta$ , то спиновый анализатор электронов пропускает через себя количество электронов, пропорциональное  $\cos^2(\theta/2)$ . Есть надежда, что уже в недалеком будущем спиновый анализатор электронов будет ключевым измерительным устройством в спиновом квантовом компьютере так же, как закон Малюса уже сейчас используется в фотонных квантовых компьютерах.

### **Приложение 1. Уравнение диффузии для баллистического транспорта.**

Звучит противоречиво как и термин «упругий резистор» [1]. Разве диффузионное уравнение не должно было бы описывать диффузионный транспорт? Можно ли использовать уравнение диффузии для баллистического транспорта? С позиций концепции «снизу – вверх» оба режима переноса – диффузионный и баллистический – существенно близки.

Уравнение диффузии связывает электрический ток с градиентом электрохимического потенциала  $\mu(z)$

$$\frac{I}{A} = -\frac{\sigma}{q} \frac{d\mu}{dz}, \quad (A1.1)$$

где удельная проводимость  $\sigma$  дается уравнениями (65) и (68) из [1]. Это уравнение можно получить рассматривая проводник как последовательность упругих резисторов (рис. A1.1). Используя ур-е (32) из [1], для тока  $I(z)$  в отдельной секции проводника можно написать

$$I(z) = \frac{1}{q} \int_{-\infty}^{+\infty} dE G(E) (f(z, E) - f(z + \Delta z, E)). \quad (A1.2)$$

Из уравнений (42) и (50) работы [1] для проводимости в диффузионном режиме имеем

$$G = \frac{\sigma}{L + \lambda} \{1, W, A\}, \quad (A1.3)$$

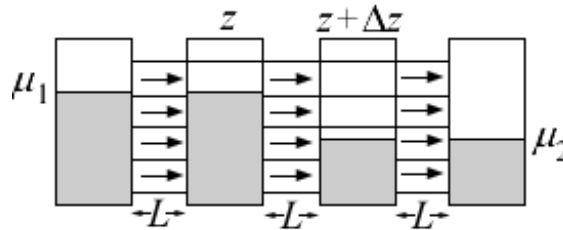


Рис. A1.1 – Условное разбиение реального макропроводника на последовательность упругих резисторов [1].

откуда следует, что

$$\frac{1}{G(E)} = \rho \frac{\Delta z + \lambda}{A}, \quad (A1.4)$$

однако, при этом нужно отметить, что сопротивление (A1.4) включает в себя граничные сопротивления, которые на самом деле не существуют, разве что на физически реальных концах проводника. Опуская их, для проводимости имеем

$$G(E) = \frac{\sigma A}{\Delta z}, \quad (A1.5)$$

Комбинируя (A1.5) с уже привычным линейным разложением для малой разности электрохимических потенциалов

$$f(z, E) - f(z + \Delta z, E) = \left( -\frac{\partial f_0}{\partial E} \right) (\mu(z) - \mu(z + \Delta z)), \quad (A1.6)$$

которое следует из уравнения (20) работы [1], и определяя удельную проводимость  $\sigma$  как термически среднее  $\bar{\sigma}$  от  $\sigma(E)$ , получим

$$I(z) = \frac{1}{q} \frac{\sigma A}{\Delta z} (\mu(z) - \mu(z + \Delta z)). \quad (A1.7)$$

Обратим внимание на то, что удельные проводимости (65) и (68) работы [1], как и проводимости выше в уравнениях (A1.5) и (A1.7), зависят от энергии. Они должны быть усреднены в промежутке нескольких  $kT$ , включая  $E = \mu_0$ , с использованием функции термического уширения

$$\bar{\sigma} = \int_{-\infty}^{+\infty} dE \left( -\frac{\partial f_0}{\partial E} \right) \sigma(E). \quad (A1.8)$$

Именно такая термически усредненная проводимость  $\bar{\sigma}$  должна сравниваться с удельной проводимостью в классических формулах теории Друде (формулы (69) и (71) работы [1]). В вырожденных проводниках усредненная проводимость  $\bar{\sigma}$  приблизительно равна проводимости при  $E = \mu_0$ :

$$\bar{\sigma} \approx \sigma. \quad (E = \mu_0) \quad (A1.9)$$

Вернемся к уравнению (A1.7). Устремляя  $\Delta z \rightarrow 0$ , получим искомое уравнение диффузии (A1.1).

Уравнение диффузии обычно идет в паре с уравнением непрерывности. В одномерных проводниках, как на рис. А1.2 далее, в условиях равновесия ток постоянен на всем протяжении проводника

$$\frac{dI}{dz} = 0. \quad (\text{A1.10})$$

Решение системы уравнений (A1.1) и (A1.10) ищется при граничных условиях

$$\begin{aligned} \mu(z=0) &= \mu_1, \\ \mu(z=L) &= \mu_2. \end{aligned} \quad (\text{A1.11})$$

Линейное решение, графически показанное на рис. А1.2, удовлетворяет систему уравнений (A1.1) и (A1.10) с граничными условиями (A1.11), поскольку линейная



Рис. А1.2 – К решению системы уравнений (A1.1) и (A1.10) с граничными условиями (A1.11). Как и в [1], всегда используется направление тока  $S \rightarrow D$  в отличие от общепринятого направления.

зависимость  $\mu(z)$  имеет постоянный наклон

$$\frac{d\mu}{dz} = -\frac{\mu_1 - \mu_2}{L}, \quad (\text{A1.12})$$

так что из уравнения (A1.1) имеем постоянный ток с  $dI/dz = 0$

$$I = \frac{\sigma A}{q} \frac{\mu_1 - \mu_2}{L}. \quad (\text{A1.13})$$

Разность электрохимических потенциалов  $\mu_1 - \mu_2 = qV$ . Имеем стандартный закон Ома

$$I = \frac{\sigma A}{L} V, \quad (\text{A1.14})$$

а не закон Ома, модифицированный для учета также баллистического транспорта [1],

$$I = \frac{\sigma A}{L + \lambda} V. \quad (\text{A1.15})$$

Можно ли получить модифицированный закон Ома (A1.15) из уравнений диффузии и непрерывности (A1.1) и (A1.10)? На первый взгляд нет, поскольку традиционная проводимость и коэффициент диффузии не имеют смысла для баллистического транспорта. И все же можно пользоваться уравнениями (A1.1) и (A1.10) для баллистического транспорта, если модифицировать граничные условия (A1.11) путем учета в них граничного сопротивления

$$\begin{aligned} \mu(z=0) &= \mu_1 - \frac{qIR_B}{2}, \\ \mu(z=L) &= \mu_2 - \frac{qIR_B}{2}, \end{aligned} \quad (\text{A1.16})$$

где  $R_B$  есть обратное значение баллистической проводимости  $G_B$  (формулы (50) и (66) работы [1])

$$R_B = \frac{\lambda}{\sigma A} = \frac{h}{q^2 M}. \quad (\text{A1.17})$$

Новые граничные условия (A1.16) можно реализовать в виде граничных сопротивлений  $R_B/2$ , что ведет к скачкам химпотенциалов, как показано на рис. A1.3.

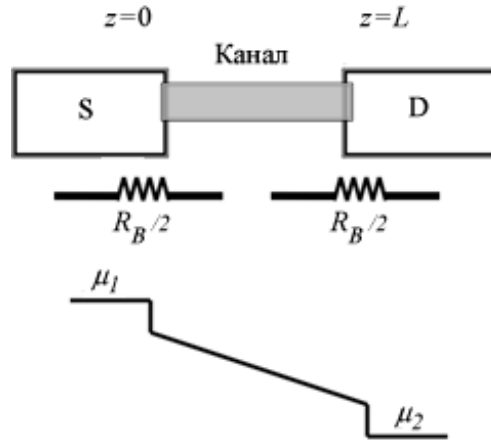


Рис. A1.3 – Уравнения A1.1 и A1.10 можно использовать не только для описания диффузионного транспорта, но и для баллистического транспорта, если граничные условия (A1.11) модифицировать путем введения граничных сопротивлений  $R_B/2$ .

Теперь легко убедиться, что новые граничные условия (A1.16) в применении к однородному проводнику ведут к модифицированному закону Ома (A1.15). Поскольку  $\mu(z)$  меняется линейно от  $z=0$  к  $z=L$ , ток по уравнению (A1.1)

$$I = \frac{\sigma A}{q} \frac{\mu(0) - \mu(L)}{L} \quad (\text{A1.18})$$

Используя новые граничные условия (A1.16), имеем

$$I = \frac{\sigma A}{q} \left( \frac{\mu_1 - \mu_2}{L} - \frac{qIR_B}{L} \right). \quad (\text{A1.19})$$

Поскольку

$$\sigma AR_B = \lambda, \quad (\text{A1.20})$$

то

$$I \left( 1 + \frac{\lambda}{L} \right) = \frac{\sigma A}{q} \left( \frac{\mu_1 - \mu_2}{L} \right). \quad (\text{A1.21})$$

Учитывая, что  $\mu_1 - \mu_2 = qV$ , окончательно получаем модифицированный закон Ома (A1.15).

Можно ли обосновать новые граничные условия (A1.16)? Да, поскольку они следуют из модифицированного закона Ома (A1.15), если предположить, что дополнительное сопротивление  $\sigma A/\lambda$  (A1.20) делится поровну между двумя границами проводника.

Лучшее обоснование можно достичь, если ввести два различных электрохимических потенциала  $\mu^+$  и  $\mu^-$ , соответствующих движению электронов вдоль осей  $+z$  и  $-z$ , соответственно. Ранее [1] предполагалось, что оба контакта настолько массивны, что всегда находятся вблизи равновесия и описываются фермиевскими функциями (16) и (17) работы [1] с хорошо определенными электрохимическими потенциалами. Сейчас же мы говорим о  $\mu(z)$  в канале, не

находящемся в равновесии, когда электронные состояния, переносящие электроны, заселены различно для электронов, движущихся вдоль направлений  $+z$  и  $-z$ , в противном же случае тока не будет. Это различие в заселенности находит свое отражение в различии  $\mu^+$  и  $\mu^-$ , и мы позже покажем, что ток пропорционален этой разности

$$I = \frac{q}{h} M (\mu^+(z) - \mu^-(z)), \quad (\text{A1.22})$$

что можно переписать используя (66) из [1] в виде

$$I = \frac{1}{qR_B} (\mu^+(z) - \mu^-(z)) = \frac{\sigma A}{q\lambda} (\mu^+(z) - \mu^-(z)). \quad (\text{A1.23})$$

Корректные граничные условия для  $\mu^+$  и  $\mu^-$  следующие:

$$\begin{aligned} \mu^+(z=0) &= \mu_1, \\ \mu^-(z=L) &= \mu_2, \end{aligned} \quad (\text{A1.24})$$

которые можно понять из следующих соображений (рис. A1.4). Электроны, генерируемые на границе  $z=0$  в направлении  $+z$ , подчиняются фермиевскому распределению с потенциалом  $\mu_1$ . Аналогично, электроны, генерируемые на границе  $z=L$  в направлении  $-z$ , подчиняются фермиевскому распределению  $\mu_2$  на правом контакте.

Ток связан с потенциалами  $\mu^+$  и  $\mu^-$  уравнениями

$$I = -\frac{\sigma A}{q} \frac{d\mu^+}{dz} = -\frac{\sigma A}{q} \frac{d\mu^-}{dz}, \quad (\text{A1.25})$$

которые эквивалентны уравнению диффузии (A1.1), примененному к усредненному потенциалу

$$\mu(z) = \frac{\mu^+(z) + \mu^-(z)}{2}. \quad (\text{A1.26})$$

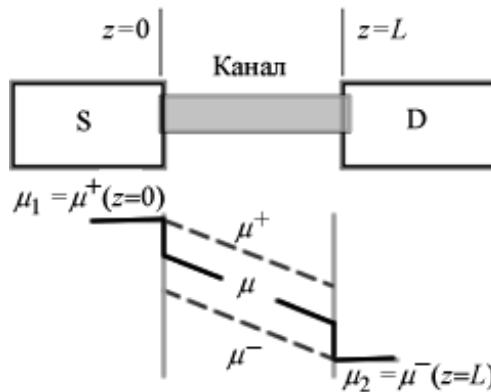


Рис. A1.4 – Профиль электрохимических потенциалов  $\mu^+$  и  $\mu^-$  в канале проводимости.

Уравнения (A1.25) решаются с граничными условиями (A1.24) и дают графики для  $\mu^+$  и  $\mu^-$ , показанные на рис. A1.4, и их среднее значение действительно выглядит как на рис. A1.3 с соответствующими скачками потенциала на концах.

И все же, нет нужды отказываться от традиционного уравнения диффузии (A1.1) в пользу нового уравнения (A1.25). Те же результаты можно просто получить модифицируя граничные условия для  $\mu(z)$  с использованием уравнений (A1.22) – (A1.25) следующим образом для левого конца проводника

$$\mu(z=0) = \left( \frac{\mu^+ + \mu^-}{2} \right)_{z=0} = \left( \mu^+ - \frac{\mu^+ - \mu^-}{2} \right)_{z=0} = \mu_1 - (qIR_B / 2) \quad (\text{A1.27})$$

и для правого конца

$$\mu(z=L) = \left( \mu^- + \frac{\mu^+ - \mu^-}{2} \right)_{z=L} = \mu_2 + \frac{qIR_B}{2}. \quad (\text{A1.28})$$

Это в точности те же самые граничные условия для стандартного уравнения диффузии, что и выписанные раньше (A1.16).

**Электрохимические потенциалы вдали от равновесия.** Как уже упоминалось выше в отношении электрохимических потенциалов внутри контактов, оба контакта настолько массивны, что всегда находятся вблизи равновесия и описываются фермиевскими функциями (16) и (17) работы [1] с хорошо определенными электрохимическими потенциалами. Канал проводимости, однако, не находится в равновесии, так что распределение электронов по доступным состояниям может и не описываться фермиевскими функциями.

В общем случае нужно решать транспортное уравнение Больцмана [14, 15], а в квантовом случае использовать формализм неравновесных функций Грина [16 – 18] для получения соответствующих функций распределения  $f(z, E)$ . Можно ли представить эти распределения с использованием электрохимических потенциалов  $\mu^+(z)$  и  $\mu^-(z)$ ?

В канале с идеальной баллистической проводимостью использование  $\mu^+(z)$  и  $\mu^-(z)$  является строгим решением, а не приближенным. Все электроны, движущиеся от истока S в направлении  $+z$  (рис. A1.5), подчиняются фермиевскому распределению на этом контакте с  $\mu^+ = \mu_1$

$$f^+(z; E) = f_1(E) \equiv \frac{1}{\exp\left(\frac{E - \mu_1}{kT}\right) + 1}, \quad (\text{A1.29})$$

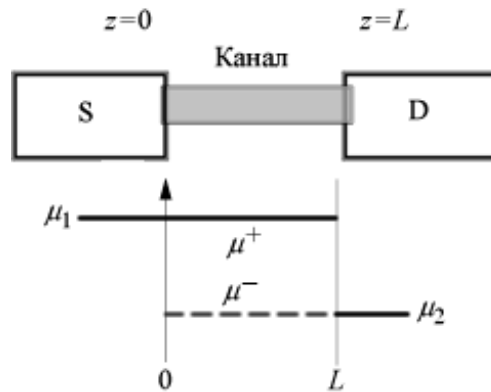


Рис. A1.5 – Профили электрохимических потенциалов  $\mu^+(z)$  и  $\mu^-(z)$  в канале с идеальной баллистической проводимостью.

а все электроны стока D, движущиеся в направлении  $-z$ , подчиняются распределению на стоке с  $\mu^- = \mu_2$

$$f^-(z; E) = f_2(E) \equiv \frac{1}{\exp\left(\frac{E - \mu_2}{kT}\right) + 1}. \quad (\text{A1.30})$$

В дополнение к сказанному заметим, что связанные со стоком D моды, берущие свое начало на истоке S, заполнены только электронами, идущими из истока, так что эти моды остаются в равновесии с истоком с функцией распределения  $f_1(E)$ . Аналогично, связанные с

истоком моды и берущие свое начало на стоке находятся в равновесии со стоком с функцией распределения  $f_2(E)$ .

Пусть при некоторой энергии  $f_1(E) = 1$  и  $f_2(E) = 0$ , так что множество электронов на истоке S готовы к транспорту на сток D, но ни один электрон на стоке D не готов к транспорту на исток S (рис. A1.6). Можно ожидать, что связанные со стоком моды, берущие свое начало на истоке, будут вплотную заполнены электронами (трафик «бампер-к-бамперу» на скоростном шоссе), тогда как связанные с истоком моды и берущие свое начало на стоке будут пустыми (трафик в обратном направлении отсутствует).

Конечно, такая идеализированная модель баллистического канала предполагает, что в процессе транспорта электроны не возвращаются назад ни по ходу своей траектории, ни в ее конце. Именно это имеется в виду под баллистическим каналом с

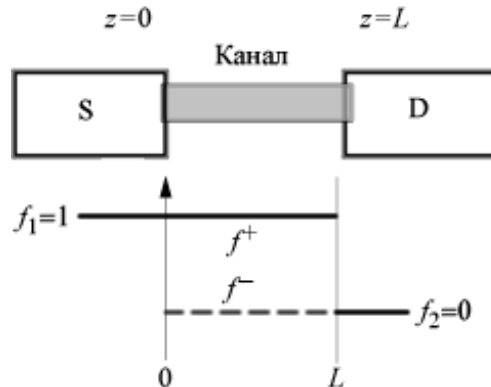


Рис. A1.6 – Профили заселенности  $f^+$  и  $f^-$  в канале с идеальной баллистической проводимостью.

хорошими контактами, когда в канале есть достаточное число мод чтобы электроны легко покинули исток с практически нулевой вероятностью вернуться назад. Если же имеют место плохие контакты или транспорт в канале проводимости носит диффузионный характер, ожидать решение с функциями распределения (A1.29) и (A1.30) не придется. Выше при обсуждении спиновых вентилях было показано к каким последствиям ведут плохие контакты. Сейчас же мы сосредоточимся на диффузионных каналах с хорошими контактами.

Функции распределения (A1.29) и (A1.30) представляются нам достаточно хорошими для диффузионного канала. Предполагается, что распределения подобны фермиевским, но учитывают пространственную зависимость электрохимических потенциалов

$$f^-(z; E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - \mu^-(z)}{kT}\right) + 1} \quad (A1.31)$$

$$f^+(z; E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - \mu^+(z)}{kT}\right) + 1}$$

Полноты ради заметим, что электрохимические потенциалы в общем случае зависят от энергии и в принципе нужно писать  $\mu^+(z, E)$  и  $\mu^-(z, E)$ . В упругих резисторах энергии мод не зависимы и могут иметь свою характерную пространственную зависимость, если длина свободного пробега от энергии не зависит. Выше в (A1.31), упрощения ради, этим обстоятельством пренебрегается.

**Токи в режиме неравновесных потенциалов.** Обычно рассматривается суммарный ток, который представляет собой разность токов, берущих свое начало на истоке и на стоке,

$$I(z) = I^+(z) - I^-(z). \quad (A1.32)$$



Ток  $I^+$  равен заряду, переносимому направо за единицу времени. За временной интервал  $\Delta t$  заряд находится на длине  $v_z \cdot \Delta t$ , так что

$$I^+(z) = q \cdot (\text{число электронов на единице длины}) \cdot v_z. \quad (\text{A1.33})$$

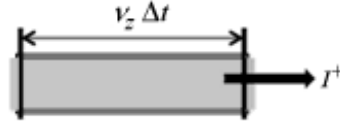


Рис. 7 – К подсчету тока, берущему свое начало на истоке.

Число электронов на единице длины равно половине плотности состояний на единице длины  $D(E)/2L$ , умноженной на долю  $f^+$  занятых состояний, так что

$$I^+(z; E) = q \frac{D(E)}{2L} \bar{v}(E) f^+(z; E), \quad (\text{A1.34})$$

где  $\bar{v}$  есть среднее значение скорости  $v_z$  согласно уравнениям (51) – (52) работы [1], а произведение  $D(E)/2L$  на скорость есть  $M(E)/h$  согласно (67) там же, так что

$$I^+(z; E) = \frac{qM(E)}{h} f^+(z; E) \quad (\text{A1.35})$$

и аналогично

$$I^-(z; E) = \frac{qM(E)}{h} f^-(z; E). \quad (\text{A1.36})$$

В итоге суммарный ток (A1.32)

$$I(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} dE (I^+(z; E) - I^-(z; E)) = \frac{q}{h} \int_{-\infty}^{+\infty} dE (f^+(z; E) - f^-(z; E)) M(E). \quad (\text{A1.37})$$

Для перехода от функций распределения  $f^+$  и  $f^-$  к электрохимическим потенциалам  $\mu^+$  и  $\mu^-$  воспользуемся приближением линейного отклика (21) работы [1]

$$f^+(z; E) - f^-(z; E) = \left( -\frac{\partial f_0}{\partial E} \right) (\mu^+(z) - \mu^-(z)), \quad (\text{A1.38})$$

так что из (A1.37) получим искомое уравнение (A1.22)

$$I(z) = \frac{q}{h} (\mu^+(z) - \mu^-(z)) \int_{-\infty}^{+\infty} dE \left( -\frac{\partial f_0}{\partial E} \right) M(E) \quad (\text{A1.39})$$

имея в виду, что стоящий справа интеграл есть термически усредненное число мод  $M$ .

**Приложение 2. Сопротивление  $R_{int}$  на границе контакта двух проводников с разным числом мод.**

Рассмотрим границу раздела между двумя проводниками с разным числом мод проводимости  $M_1 > M_2$ , граничащих с двумя массивными контактами на обоих концах, число мод в которых эффективно бесконечно велико (рис. A2.1).

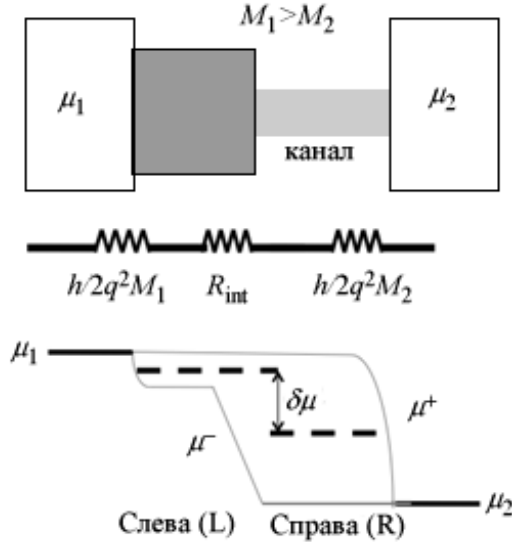


Рис. A2.1 – Граница раздела между двумя каналами проводимости (широким и узким) с модами  $M_1 > M_2$ , граничащих с массивными контактами на обоих концах, число мод в которых эффективно бесконечно велико.

Рассмотрим электрохимические потенциалы  $\mu^+$  и  $\mu^-$ , соответствующие движению электронов направо и налево, соответственно. Как показано в Приложении 1, граничные условия имеют вид

$$\mu^+(L) = \mu_1 \text{ и } \mu^-(R) = \mu_2. \quad (\text{A2.1})$$

Ток направо и налево одинаков и равен (Приложение 1)

$$I = \frac{q}{h} M_1 (\mu^+ - \mu^-)_L = \frac{q}{h} M_2 (\mu^+ - \mu^-)_R. \quad (\text{A2.2})$$

Электроны движутся свободно через границу раздела так, что движущиеся направо потоки в узком канале находятся в равновесии с движущимися направо потоками в широком канале

$$\mu^+(R) = \mu_1. \quad (\text{A2.3})$$

Движущиеся налево потоки в широком канале не могут быть адекватно заполнены узким каналом и соответствующий потенциал *a priori* не известен. Для его определения из (A2.2) имеем

$$\mu^+(L) - \mu^-(L) = \frac{M_2}{M_1} (\mu^+(R) - \mu^-(R)). \quad (\text{A2.4})$$

Подставляя далее (A2.1) и (A2.3), получим

$$\mu^-(L) = \mu_1 - \frac{M_2}{M_1}(\mu_1 - \mu_2). \quad (\text{A2.5})$$

Для вычисления граничного сопротивления  $R_{int}$  нужно вычислить скачок потенциала на границе контакта двух проводников

$$\delta\mu = \left( \frac{\mu^+ + \mu^-}{2} \right)_L - \left( \frac{\mu^+ + \mu^-}{2} \right)_R. \quad (\text{A2.6})$$

Используя (A2.1), (A2.3) и (A2.5), имеем

$$\delta\mu = \left( 1 - \frac{M_2}{M_1} \right) (\mu_1 - \mu_2), \quad (\text{A2.7})$$

$$I = \frac{q}{h} M_2 (\mu_1 - \mu_2), \quad (\text{A2.8})$$

и окончательно получаем искомую формулу для граничного сопротивления

$$R_{int} \equiv \frac{\delta\mu / q}{I} = \frac{h}{2q^2} \left( \frac{1}{M_2} - \frac{1}{M_1} \right). \quad (\text{A2.9})$$

Настоящая работа явилась результатом посещения мною курсов лекций «Fundamentals of Nanoelectronics, Part I: Basic Concepts» и «Fundamentals of Nanoelectronics, Part II: Quantum Models», прочитанных он-лайн в январе – апреле 2012 года проф. С.Датта (Supriyo Datta) в рамках инициативы Purdue University / nanoHUB-U [[www.nanohub.org/u](http://www.nanohub.org/u)].

### Список литературы

1. *Кругляк Ю.О., Кругляк Н.Ю., Стрѣха М.В.* Уроки нанoeлектроніки: виникнення струму, формулювання закону Ома і моди провідності в концепції «знизу – вгору» // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. – 2012. – V. 3(9), N 4. – P. 5 – 29.
2. *Кругляк Ю.О., Кругляк Н.Ю., Стрѣха М.В.* Уроки нанoeлектроніки: термоелектричні явища в концепції «знизу – вгору» // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. – 2013. – V. 4(10), N 1. – P. 6 – 21.
3. *Datta Supriyo.* Lessons from Nanoelectronics: A New Perspective on Transport. – Hackensack, New Jersey: World Scientific Publishing Co. – 2012. – pp. 471.
4. *Dyakonov M.I., Perel V.I.* Current-induced spin orientation of electrons in semiconductors // *Physics Letters*. – 1971. – V. A35. – P. 459 – 460.
5. *Julliere M.* Tunneling between ferromagnetic films // *Physics Letters*. – 1975. – V. A54, N 3. – P. 225 – 226.
6. *Аронов А.Г., Пикус Г.Е.* Спиновая инжекция в полупроводниках // *Физика и техника полупроводников*. – 1976. – № 10. – С. 1177 – 1180.
7. *Baibich M. N., Broto J. M., Fert A., Nguyen Van Dau F., Petroff F., Etienne P., Creuzet G., Friederich A., Chazelas J.* Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices // *Phys. Rev. Lett*. – 1988. – V.61, N 21. – P. 2472 – 2475.

8. *Binasch G., Grünberg P., Saurenbach F., Zinn W.* Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange // *Phys. Rev. B.* – 1989. – V. 39. – P. 4828 – 4830.
9. *Mott N.F.* The Electrical Conductivity of Transition Metals // *Proc. Roy. Soc.* – 1936. – V. 153. – P. 699 – 717.
10. *Mott N.F.* Electrons in Transition Metals // *Adv. Phys.* – 1964. – V. 13. – P. 325.
11. *Погорілий А.М., Рябченко С.М., Товстолиткін О.І.* Спінтроніка. Основні явища. Тенденції розвитку // *Укр. фіз. журн. Огляди.* – 2010. – т. 6, № 1. – С. 37 – 97.
12. *Schmidt G.* Concepts for Spin Injection into Semiconductors – a Review // *J.Phys. D: Appl. Phys.* – 2005. – V. 38. – P. R107 – R122.
13. *Valet T., Fert A.* Theory of the perpendicular magnetoresistance in magnetic multilayers // *Phys. Rev. B.* – 1993. – V. 48. – P. 7099.
14. *Sears F.W., Salinger G.L.* Thermodynamics, Kinetic Theory, and Statistical Thermodynamics. – Boston: Addison-Wesley. – 1975. – pp. 331 – 336, 355 – 361.
15. *Kubo R.* Statistical-Mechanical Theory of Irreversible Processes.I. General Theory and Simple Applications to Magnetic and Conduction Problems // *J.Phys.Soc. Japan.* – 1957. – V. 12. – P. 570 – 586.
16. *Martin P.C., Schwinger J.* Theory of many-particle systems. I // *Phys. Rev.* – 1959. – V. 115, N 6. – P. 1342 – 1373.
17. *Kadanoff L.P., Baym G.* Quantum Statistical Mechanics. – New York: W.A.Benjamin. – 1962.
18. *Keldysh L.V.* Diagram Technique for Non-Equilibrium Processes // *ЖЭТФ.* – 1964. – Т. – 47. – С. 1515 – 1527 (*Sov. Phys. JETP.* – 1965. – V. 20. – P. 1018).
19. *Takahashi S., Maekawa S.* Spin Injection and Detection in Magnetic Nanostructures // *Phys. Rev. B.* – 2003. – V. 67. – P. 052409.
20. *Третяк О.В., Львов В.А., Барабанов О.В.* Фізичні основи спінової електроніки // Київ: Вид-во Київського університету. – 2002. – 314 С.
21. *Данилов Ю.А., Демидов Е.С., Ежевский А.А.* Основы спинтроники // Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского. – 2009. – 173 С.
22. *Аплеснин С.С.* Основы спинтроники // Санкт-Петербург: Изд-во ЛАНЬ. – 2010. – 288 С.
23. *Tsoi M., Jansen A.G.M., Bass J., Chiang W.-C., Seck M., Tsoi V., Wyder P.* Excitation of a Magnetic Multilayer by Electric Current // *Phys. Rev. Lett.* – 1998. – V. 80. – P. 4281.
24. *Myers E.B., Ralph D.C., Katine J.A., Louie R.N., Buhrman R.A.* Current-Induced Switching of Domains in Magnetic Multilayer Devices // *Science.* – 1999. – V. 285. – P. 867 – 870.
25. *Katine J.A., Albert F.J., Buhrman R.A., Myers E.B., Ralph D.C.* Current-Driven Magnetization Reversal and Spin-Wave Excitations in Co/Cu/Co Pillars // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – V. 84. – P. 3149 – 3152.
26. *Berger L.* Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current // *Phys.Rev. B.* – 1996. – V. 54, N 13. – P. 9353 – 9358.
27. *Slonczewski J.C.* Current-driven excitation of magnetic multilayers // *J. Magn. Magn. Mater.* – 1996. – V. 159. – P. L1.
28. *Bazaliy Y.B., Jones B.A., Zhang S.-C.* Modification of the Landau-Lifshitz equation in the presense of a spin-polarized current and colossal- and giant-magnetoresistive materials // *Phys.Rev. B.* – 1998. – V. 57. – P. R3213 – R3216.
29. *Sun J.Z.* Spin-current interaction with a monpdomain magnetic body: A model study // *Phys.Rev. B.* – 2000. – V. 62. – P. 570.
30. *Ralph D.C., Stiles M.D.* Spin transfer torques // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2008. – V. 320. – P. 1190 – 1216.
31. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* К теории дисперсии магнитной проницаемости ферромагнитных тел // *Phys. Z. Sowjetunion.* – 1935. – V. 8. – P. 153 – 169.
32. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* К теории дисперсии магнитной проницаемости ферромагнитных тел // *Ландау Л.Д. Собрание трудов в 2 т. Под ред. Е.М. Лифшица. М.: Наука.* – 1969. – Т. 1. – С. 97.
33. *Gilbert T.* A phenomenological theory of damping in ferromagnetic materials // *IEEE Transactions on Magnetics.* – 2004. – V. 40, N 6. – P. 3443 – 3449.

34. Звездин А.К., Звездин К.А., Хвальковский А.В. Обобщенное уравнение Ландау — Лифшица и процессы переноса спинового момента в магнитных наноструктурах // УФН. – 2008. – Т. 178. – С. 436 – 442.
35. Mewes Tim. Magnetization dynamics including spin-torque *et al* // [www.bama.ua.edu/~tmewes/](http://www.bama.ua.edu/~tmewes/).

**Засади спітроніки в концепції «знизу – вгору». Кругляк Ю.О.**

*В рамках концепції «знизу – вгору» наноелектроніки розглядаються такі ключові питання спітроніки як спіновий вентиль, граничний опір при незбіганні мод провідності, спінові потенціали і різниця нелокальних спин-потенціалів, спіновий момент та його транспорт, рівняння Ландау – Лифшица – Гільберта, на його основі дається відповідь на питання чому у магніта є відделена вісь, обговорюються обертання намагніченості спіновим струмом, поляризатори та аналізатори спінового струму, також розглядаються рівняння дифузії для балістичного транспорту та струми в режимі нерівноважних потенціалів.*

**Ключові слова:** *нанофізика, наноелектроніка, молекулярна електроніка, знизу–вгору, спітроніка, спіновий вентиль, спіновий потенціал, спіновий момент, спіновий транспорт, спіновий струм, намагніченість, поляризатор, аналізатор, рівняння дифузії, балістичний транспорт.*

**Basics of Spintronics by «bottom – up» approach. Kruglyak Yu.A.**

*Basic topics of spintronics such as spin valve, interface resistance due to mode mismatch, spin potentials, non-local spin voltage, spin moment and its transport, Landau – Lifshitz – Gilbert equation, and explanation on its basis why a magnet has an “easy axis”, nanomagnet dynamics by spin current, polarizers and analyzers of spin current, diffusion equation for ballistic transport and current in terms of non-equilibrium potentials are discussed in the frame of the «bottom – up» approach of modern nanoelectronics.*

**Keywords:** *nanophysics, nanoelectronics, molecular electronics, bottom – up, spintronics, spin valve, spin potential, spin moment, spin transport, spin current, magnetization, polarizer, analyzer, diffusion equation, ballistic transport.*

*Надійшла до редакції 25.03.2013  
Прийнята до публікації 26.09.2013*

УДК 538.9:539.215

**О.И. Герасимов, д.ф.-м.н.**

*Одесский государственный экологический университет*

## **ФИЗИКА ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. ЧАСТЬ 1.**

*Работа открывает серию статей, посвященных обзору состояния исследований в актуальном стремительно развивающемся направлении современной физики мягкой материи: физике гранулированных материалов, проявляющих уникальные, промежуточные по отношению к известным агрегатным состояниям: газам, жидкостям, аморфным и твердым телам и представляющих собой сложные, многочастичные, существенно нелинейные, динамические диссипативные микромеханические системы.*

*В части первой освещаются некоторые типичные, зачастую экстраординарные как структурные так и динамические свойства, а также обсуждаются отдельные направления их исследований. Дискутируются проблемы и перспективы развития общей теории и методов физического и численного моделирования таких материалов, их адекватность, а также намечаются темы и вопросы, которые планируется осветить в предстоящей серии обзоров.*

**Ключевые слова:** динамические диссипативные системы, мягкая материя, гранулированные материалы.



Самое сложное находясь в центре пустыни, это найти песок ...

Настоящая работа открывает серию публикаций, посвященных описанию современного состояния исследований и перспектив их развития и применения в новой, стремительно развивающейся области физики, связанной с изучением физических свойств гранулированных материалов (ГМ) являющейся составным компонентом оформившегося в последнее время направления - физики мягкой материи. Перечень тем, на которых сфокусированы усилия теоретиков и экспериментаторов в этой области впечатляет как широтой охвата, так и концептуальной глубиной проработки ее положений. Если к этому добавить без преувеличения экстраординарный характер чуть ли не большинства основных проявляемых гранулированной материей свойств, а также возможность их исследования с помощью наблюдений практически невооруженным глазом уникальный характер этой отрасли физики становится очевидным. Глобальный масштаб, в котором представлены гранулированные материалы в окружающей среде превращает задачу понимания законов их поведения в истребованную уже с точки зрения обеспечения самой безопасности жизнедеятельности человечества. В качестве примера, иллюстрирующего отмеченное обстоятельство на рис.1,2,3 приведены лишь некоторые катастрофические ситуации связанные с проявлением гранулированной материей ее отдельных, уникальных с точки зрения физики и катастрофически опасных для общения с ними свойств (распространяющиеся дюны в пустыне, “поедающие” оазисы цивилизации, неупругий коллапс и связанные с ним критические напряжения, вызывающие разрушения конструкций емкостей хранения, вязкоупругие свойства зыбучих песков). И это только незначительная часть в перечне подобных свойств и связанных с ними явлений!



Рис.1 – Неупругий коллапс в емкости хранения цемента расположенной вблизи маневровой железнодорожной магистрали.

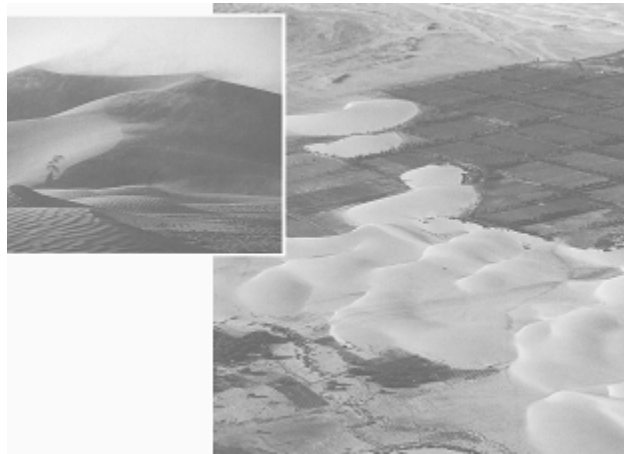


Рис.2 – Перемещающиеся дюны в пустыне способны уничтожить оазисы цивилизации.



Рис.3 – ”Тонущий” в зыбучих песках автомобиль.

Как уже говорилось, исследования структуры и физических свойств гранулированных материалов (ГМ) составляют весьма значительную часть усилий физиков, как теоретиков, так и экспериментаторов [1-4]. Среди причин, приведших к такой концентрации усилий обычно указывается проявление ГМ необычных для типичных агрегатных состояний вещества свойств. И действительно, например, такие явления как, скажем, флюидизация сухих ГМ под действием внешних полей (осыпание наклонных насыпей), насыщение давления в вертикальной емкости,

содержащей ГМ (эффект “арки”), сегрегация (разделение сухих смесей, например, эффект “бразильского ореха”) и некоторые другие проявляются только в ГМ.

Интерес к изучению ГМ также обусловлен важностью понимания их физических свойств для рационализации промышленного производства и возможностью создания на их основе принципиально новых наукоемких технологий. ГМ широко представлены в окружающей среде и используются в производстве (пудра, песок, цемент, графит, уголь, зерно, сыпучие порошки и смеси в пищевой, строительной и химической промышленности, металлургии, почва и даже Вселенная – вот далеко неполный список такого рода применений). По некоторым оценкам, более 60% всего мирового промышленного производства полностью основано или частично использует ГМ различной дисперсности: от микро-пудр с размерами гранул порядка нескольких микрон до геологических структур с размерами отдельных каменных монолитов в несколько метров и более. Наконец Вселенная, с некоторыми оговорками, также может быть отнесена к одному из примеров разреженных гранулированных систем (гранулированный газ).

Многие уникальные свойства гранулированной материи наблюдались достаточно давно. В этой связи, достаточно упомянуть наблюдение Фарадеем нелинейных волн на поверхности песчаного слоя, помещенного в поле виброускорений, осуществленное им около 160 лет тому назад.

Материалы, с которыми мы сталкиваемся в нашей повседневной жизни, мы обычно классифицируем с точки зрения их агрегатного состояния как газы, жидкости или твердые тела. А к какому из перечисленных состояний конденсированной материи можно отнести гранулированную среду? Ведь она может «течь» с наклонной плоскости как лавина или принимать форму сосуда, куда мы ее помещаем (насыпаем) подобно жидкости. Каждая, отдельно взятая гранула, скажем песок, безусловно – твердое тело, однако конгломерация гранул уже показывает свойства совершенно нетипичные для обычных агрегатных состояний (и для твердых тел в частности).

Поведение гранулированных материалов при манипуляциях над ними действительно выглядит совершенно специфично. Так, например, если медленно насыпать песок на подложку, то холм будет расти, сохраняя конусообразную форму, пока угол у основания раствора не достигнет некоторого критического значения. После достижения этого критического параметра начинается осыпание верхних слоев насыпи, которое внешне напоминает лавину. Причем в лавинообразном движении принимают участие лишь частицы, принадлежащие слою некоторой толщины – вблизи поверхности конусообразной насыпи, в то время как остальной массив остается в состоянии покоя. Очень многие материалы, окружающие нас в повседневной жизни и составляющие основу различных отраслей индустрии (строительной, химической, фармакологической, пищевой) находятся как раз в гранулированном состоянии. Вообще, среди потребляемых и используемых человечеством материалов в подавляющем большинстве, на той или иной стадии производства, обработки или потребления, находятся, главным образом, либо в жидком, либо в гранулированном состоянии.

Тем более удивительно, что понимание физической природы многих процессов, происходящих в гранулированных процессах, до сих пор отсутствует или достигнуто частично. Такое положение дел привело даже к тому, что некоторые производства, использующие гранулированные материалы, встретились с явлениями, которые возможно объяснить лишь признав существование специфических свойств гранулированных материалов (неупругий коллапс), проявляющихся под воздействием внешних возмущений.

Мы, например, на собственном опыте можем легко убедиться, что смоченный некоторым количеством воды песок, способен удерживать форму конструкции (песчаные замки, которые дети с удовольствием возводят на пляже). Та же самая вода, но уже в большем количестве, способна размыть конструкции из сырого песка, лишив ее устойчивости. Известно, что во время землетрясения мокрые грунты плывут подобно жидкостям. А, скажем, с явлением, получившим название «зыбучие пески», хорошо знакомы, по крайней мере, те из нас, кто рискнул передвигаться по песчаному грунту (например, в пустыне) на транспортном средстве.

Таким образом, помимо перспектив эффективного применения гранулированных материалов в связи с их уникальными свойствами, в технологиях, развитие фундаментальной



теории, которая позволила бы понять и предвидеть особенности их поведения, является весьма актуальной задачей.

На первый взгляд, построение физической теории в основной своей части должно учитывать три следующих аспекта:

Трение между частицами, собственно обуславливающее диссипативный характер системы и, как следствие, ее необычное (нелинейное) поведение зависит от природы, формы, размеров частиц – гранул, а также от среды, в которую они помещены (например, вода).

Свойства и поведение гранулированных материалов часто напоминают статистические, хотя по своей природе гранулированный материал – механическая система, показывающая коллективное поведение изоморфное статистическому, вследствие своей нелинейности. Именно «коллективный характер» поведения гранулированных материалов имеют ввиду, когда употребляют термин «статическая механика гранулированных материалов». На самом деле речь идет о коллективном их поведении внешне изоморфном поведению статистически заданных систем.

Сказанное становится понятным, если заметить, что в упакованном состоянии в гранулированном материале каждая отдельная частица касается только нескольких ближайших соседних гранул – частиц (находящихся в т.н. первой, или ближайшей координационной сфере). Такая система с, так называемым, ближним порядком в локальной структуре, вследствие нелинейности, обусловленной диссипативными процессами, глобально ведет себя в существенной зависимости именно от локальной степени упорядоченности. Следует заметить, что влияние диссипативных эффектов зачастую столь маскировано наглядно проявляемыми свойствами свободного объема, незанятого гранулами в ходе динамики, что именно этот последний эффект объявляется ответственным за формирование макроскопических свойств гранулированных материалов. На самом деле, нелинейные сценарии в поведении гранулированных материалов, такие скажем как поверхностные возбуждения (волны, осциллоны, левитирующие слои и многие другие) обязаны своим происхождением именно диссипативным процессам.

Как уже говорилось выше, гранулированные материалы могут (при специальных условиях) проявлять отдельные свойства жидкостей. Впрочем, следует отметить, что речь идет все-таки о свойствах не вполне обычных (сухих?) жидкостях. Например, слой гранул в вертикальном поле виброускорений демонстрирует коллективное явление всплывания парящей капли жидкости над подогретой подложкой (получившее название аналога эффекта Лейденфроста), имеющее совершенно самостоятельную физическую природу, отличную от своего классического прототипа.

Более толстый слой гранул на однородно возмущаемой в вертикальном направлении горизонтальной подложке покрывается сеткой ячеек (паттернов), имеющих симметрию (например – гексагональную), зависящую от условий возбуждения, толщины слоя и типа гранул. Явление, напоминающее вышеописанное наблюдается во время тектонических явлений на поверхности грунтов, причем «жидкая» гранулированная фаза сосуществует с «твердотельной». Описанное свойство внешне выглядит изоморфно по отношению к явлению формирования ячеек Бенара при конвективной неустойчивости в подогреваемом снизу слое жидкости в гравитационном поле, хотя, как понятно, имеет совершенно иную физическую природу.

Сходное по природе явление, которое условно можно было бы назвать «вскипанием», наблюдалось в направленно возмущаемом вертикально горизонтальном слое гранулированного материала (металлические дробинки). Это явление получило название осцилона. При некоторых условиях осцилоны возникают парами и даже группами, демонстрируя очевидный нелинейный характер явления.

Все перечисленные выше примеры, а также многие другие, которые не были упомянуты, но известны нам из повседневного общения с гранулированными материалами в лабораторных условиях и в окружающей среде, позволяют считать такие системы уникальной лабораторий для изучения природы локального упорядочения и равновесия, а также формирования упорядоченных структур в мезо- и в макро-масштабах, что является одним из ключевых вопросов физики конденсированного состояния вещества. Можно сказать, что природа открывает нам возможность изучить возможность существования уникального

скейлинга при масштабировании структуры материи! Масштабность применения гранулированных материалов в различных производственных технологиях, низкая энергоемкость в манипулировании ними, а также их присутствия в натуральном виде в окружающей среде впечатляет и не оставляет сомнений в важности изучения их структуры и динамики поведения во внешних полях различной природы, понимания механизмов формирования их свойств и возможности управления ними. Перейдем теперь к обсуждению методов, которые применяются для изучения отдельных наблюдаемых свойств гранулированных материалов, помещенных в различные внешние условия.

Несмотря на наличие многочисленных исследований, еще до сравнительно недавнего времени существовало весьма ограниченное понимание тех физических законов, которые лежат в основе наблюдаемых в ГМ эффектов и явлений. Можно сказать, что и до настоящего времени не существует общепризнанного теоретического подхода к описанию многих наблюдаемых физических свойств ГМ. Известный прогресс в их изучении достигнут на пути численного моделирования отдельных свойств на основе физических моделей, экстраполированных из статистической физики, физики твердого тела, физики сплошной среды, а также из теории динамических систем [5- 24].

Перед тем, как перейти к описанию исследований, которые в настоящее время интенсивно осуществляются на пути изучения физических свойств гранулированной материи, еще раз кратко напомним некоторые из ее общих признаков. Гранулированные системы представляют собой конгломераты из большого числа дискретных макроскопических (с дисперсией от нескольких микрон до километров!) частиц, взаимодействующих лишь посредством сил отталкивания. Их внешняя форма полностью определяется заданием граничных условий (например, формой объема включения) и(или) действием внешних полей (например – гравитационных). Существенным является то, что действующие между гранулами в точке контакта силы отталкивания являются по своей природе диссипативными (например, даже в состоянии покоя, действуют силы герцевского статического трения). Гранулированный материал, таким образом, представляет собой неравновесную, нелинейную, диссипативную, многочастичную механическую систему, динамика которой, требует, вообще говоря, специального определения и безусловно относится к числу в равной степени актуальных и исключительно сложных задач современной физики.

Вследствие своей физической сложности, гранулированные материалы, несмотря на кажущуюся внешнюю простоту (ну что, в самом деле, может быть проще песка, который мы привычно ощущаем ступая по пляжу, или растворимого кофе и ложки сахара к нему?), вообще говоря, ведут себя отличным образом по сравнению с газами, жидкостями и твердыми телами, хотя при некоторых внешних условиях и могут проявлять отдельные признаки вышеперечисленных типичных агрегатных состояний.

Необходимо постоянно помнить, что любое наблюдаемое поведение гранулированного материала, внешне напоминающее поведение газа, жидкости, твердого тела – это на самом деле динамическое явление (ведь гранулированная материя это механическая система!). Такие, внешне изоморфные свойствам конденсированной сплошной среды явления, происходят только при определенных специальных условиях, например, определенных уровнях интенсивности поступления энергии в систему, степени и симметрии упаковки гранул, их морфологии, граничных условий объемов включения и др. Заметим, также что вследствие неупругости столкновений, между гранулами, и соответственно, имеющих место потерь энергии, гранулированные материалы возмущаемые извне практически сразу переходят в состояние покоя после того, как прекращается подвод энергии. К примеру, отдельная частица, упавшая на подложку, даже неупруго отражаясь от нее, подскакивает в течение некоего времени, прежде чем остановиться. В то время как такие же гранулы насыпанные в мешок, упав вместе с ним на подложку практически сразу останавливаются. Приведенный пример, контрастно демонстрирует отличие коллективного поведения большого числа гранул от индивидуального (одной гранулы), причиной которого выступают неупругие столкновения между гранулами, ведущие к диссипации полной энергии в системе.

Прогнозирование свойств, проявляемых ГМ при различных внешних воздействиях может основываться на моделировании их поведения с помощью теоретических моделей и численных расчетов. Сложность состоит в том, что достаточно непросто осуществить

последовательный расчет взаимодействия даже двух частиц, имеющих сложную форму поверхности и отличающихся размерами. Часто для упрощения задачи, принимают, что частицы имеет форму твердых сфер, на них действуют силы тяжести, статического или динамического трения, вязкоупругости. Силы, действие которых испытывают частицы ГМ, - это силы пластической деформации. Для расчета сил, которые связаны с диссипацией энергии, необходимо знать параметры характеризующие материал гранул (такие, например, как модуль Юнга, постоянная Пуассона). Более или менее реалистическое моделирование гранулированных систем требует учета многократных столкновений большого числа частиц, что таким образом, увеличивает требуемые ресурсы машинного времени.

Вследствие диссипации энергии в гранулированной системе за счет герцевского трения, она находится в неравновесном состоянии даже в условиях отсутствия какого-либо движения системы как целого или отдельных ее элементов. Поэтому стандартные методы механики или статистической физики не могут быть непосредственно применены для описания происходящих в ГМ процессов. Модели основанные на представлениях о сплошной среде, также выглядят, в общем случае, неадекватными в применении к ГМ, так как последние являются существенно дискретными. Применение гидродинамического подхода к описанию флюидизированного поведения гранулированных систем, наблюдаемого в специальных условиях, хотя и используется для параметризации, скажем стекания гранулированных потоков с наклонных поверхностей, однако с точки зрения общей теории носит достаточно искусственный характер.

Вышеотмеченные обстоятельства превращают задачу общего теоретического описания гранулированных материалов, одновременно в сложную и интригующую проблему современной физики, смежных с ней прикладных (инженерных) дисциплин. В настоящее время теория динамических диссипативных систем, пока еще далека от завершенной формы и решение этой задачи, таким образом, должно способствовать расширению концептуальной базы физики.

Для сравнения, напомним, что в случае скажем теории жидкостей, которая получила общую формулировку благодаря работам Боголюбова, Борна, Кирквуда, Грина, Ивона (ББКГИ) [25], и многих других исследователей, мы сталкиваемся с принципиально иной проблемой: которая состоит в поиске адекватных математических методов интегрирования изначально корректно сформулированной задачи, в виде зацепляющихся нелинейных интегро-дифференциальных уравнений для многочастичных функций распределения частиц ББКГИ. Отсутствие общей теории динамических диссипативных систем в гранулированных фазах делает актуальным применение в том числе простых наглядных (приближенных) моделей и числовых методов для изучения физических процессов, которые происходят в ГМ при различных внутренних и внешних условиях [5-24].

Исследования различных физических моделей гранулированных систем, находящихся в поле тяжести и виброускорений, методами численного моделирования, позволяют получать данные о динамике их поведения.

Скажем метод молекулярной динамики (или дискретной компьютерной механики, как его еще называют) заключается в расчете движения каждой отдельной частицы из конгломерации на основе формализма механики Ньютона. Численное моделирование (эксперимент) включает также методы Монте-Карло и клеточных автоматов. На этом пути достигнут заметный прогресс в описании структуры и отдельных динамических свойств ГМ.

Существенный интерес составляют исследования процессов кластеризации в ГМ. Некоторые наблюдаемые в непосредственных физических экспериментах и относящиеся к этому классу явления выглядят интригующими и до настоящего времени не до конца понятными. Здесь стоит упомянуть, в указанной связи, эксперименты по исследованию поведения (кластеризации) гранулированных материалов, которые проводятся в космическом пространстве в условиях пониженной и полностью отсутствующей гравитации в ходе которых было экспериментально подтверждено существование в ГМ специфического типа кластеризации, известного под названием неупругого коллапса (состоящего в том что неупругие потери в гранулированных материалах могут приводить к режиму с бесконечным числом соударений за конечный промежуток времени). Сценарии поведения гранулированного материала в состоянии коллапса оказываются весьма разнообразными: от простейшего до

неоднородного. Коллапс в диссипативных системах приводит к появлению наблюдаемых, как непосредственно в экспериментах с ГМ, так при их численном моделировании, длинных, нитеподобных, уплотненных распределений частиц, а не к кластерам со сферической симметрией в распределении массы, как это можно было бы ожидать с точки зрения представлений теории среднего поля. Отметим в скобках, что симметрия наблюдаемых нитеподобных кластеров напоминает распределение галактик в видимой части Вселенной.

Физической причиной этого явления является неупругий характер соударения между частицами, ведущий к диссипации энергии и, как следствие, к нелинейному сценарию поведения.

И если каноническая задача о коллапсе в случае скачущего шарика над подложкой в поле гравитации часто интерпретируется как артефакт численного счета, то в ГМ такие состояния можно считать наглядно проявляемыми в ходе наблюдаемой в них кластеризации.

Весьма перспективным возможным применением этого явления, наблюдаемого лишь в ГМ, в промышленных технологиях может стать разработка технологии сухого синтеза с прогнозируемыми физико-механическими свойствами.

К эффектам, наблюдаемым и соизмеримым в смысле важности их практических приложений, относится явление сегрегации (разделения) сухих гранулированных смесей происходящее под действием вибровоздействий (а также производный от него эффект Бразильского ореха).

Таким образом, изучение гранулированных материалов охватывает широкий перечень явлений, происходящих в масштабах от лабораторного до астрономического, пояснение которых, зачастую кажется, бросает вызов канонической мудрости физики.

В частности, такие вопросы как: является ли явление неупругого коллапса чем-то большим, нежели красивая теоретическая концепция, или же это математический артефакт; имеет ли данное явление реальные экспериментальные подтверждения; возможно ли установить экспериментально различие между неупругим коллапсом и неупругой кластеризацией в общем виде, и многие другие еще ожидают своего разрешения.

Некоторые идеи и методы, которые развиваются при исследовании гранулированных материалов также могут применяться при изучении сложных статистических систем, в формировании свойств которых существенную роль играют метастабильные состояния. Это фаза пены, химически реагирующие системы, коллоидные растворы, запыленная плазма и некоторые другие.

Среди первоочередных задач стоящих перед исследователями гранулированной материи, помимо концептуальных и гносеологического характера, направленных на понимание общих физических принципов лежащих в основе наблюдаемых явлений, является развитие физических моделей адекватных отдельным воспроизводимо наблюдаемым свойствам гранулированных материалов различного типа при заданных внутренних и внешних условиях.

На пути построения таких простых, наглядных моделей, допускающих численное, а в ряде случаев и аналитическое решение, и, как уже говорилось, адекватных тем или иным чертам, наблюдаемых в гранулированных материалах эффектов развиваются, например, подходы, описывающие динамические явления типа компактизации и сегрегации в гранулированных материалах, концептуальные подходы использующие элементы нелинейной кинетики динамических диссипативных систем к структуризации и дефектообразованию под действием внешних возмущений, а также разрабатываются численные алгоритмы моделирующие наблюдаемые явления в ГМ.

В последующих разделах обзора будут проанализированы исследования некоторых свойств, открывающих перспективы построения как теоретических концепций так и новых технических приложений гранулированных материалов, а именно:

- неоднородная кластеризация в одномерных моделях неупруго сталкивающихся частиц; квази-стационарные состояния и неравновесные переходы между ними; динамическая природа неупругой кластеризации (коллапса);
- особенности асимметричного распространения возмущений (например, волнового типа) в гранулированных системах моделируемых низкоразмерными распределениями силовых центров с учетом эффектов беспорядка и диссипативных потерь, а также декорирования;

- медленні критичні моди в релаксації поля щільності (компактизації) в кінетичному сценарії компактизації (сегрегації), ґрунтованому на емпіричних підходах (типу Ландау-Гінзбурґа (Канна-Хільярда)) к описанню кінетики адекватно визначеного поблизу асимптотических квазістаціонарних станів поля параметра порядку і порівняльна оцінка ролі ефектів виключеного об'єму і неупругих втрат.

Як би ні були важливі і цікаві самі по собі загальні питання теорії нерівноважних, дисипативних, мікро-механічесеских систем, якими, як уже говорилося, є гранульовані матеріали, на шляхи їх застосування на практиці, в разі реальних ГМ, нас чекають проблеми, пов'язані з необхідністю врахування матеріальних співвідношень: впливу параметрів, що характеризують як морфологію, геометрію дисперсії і фізическі властивості самих гранул так і геометрію і властивості меж об'єму включення, розмірність і численні інші, що в кінцевому рахунку і визначає можливості і шляхи їх застосування. Розвиваємі фізическі моделі повинні таким чином врахувати специфіческі внутрішні, початкові і зовнішні умови в яких реалізується структура і розвивається динаміка ГМ. В цьому напрямку і будуть орієнтовані майбутні розділи огляду.

### Список літератури

1. Jaeger H.M., Nagel S.R., Behringer R.P. The physics of granular materials. //Rev.Mod.Phys.-1996.- Vol.68.- P.1259-1272.
2. Duran J. Sands, powders and grains.-New York: Springer-Verlag, 2000.-200p.
3. Kadanoff L. Built upon sand: theoretical ideas inspired by granular flows. // Rev.Mod.Phys.-1999.- Vol.71.-P.435-447.
4. de Gennes P.G. Granular matter: a tentative view. // Rev.Mod.Phys.-1999.- Vol.71,S.- P.374-385.
5. Герасимов О.І., Снівак А.Я., Худинцев М.М., Клименков О.А. Транспорт енергії (імпульсу) в модельних низьковимірних дисипативних системах. //Вісник ОДЕКУ.-2008.-№6.-С.225-233.
6. Герасимов О.І., Ванделлє Н., Снівак А.Я., Худинцев М.М., Люмс Г., Дорболо С., Клименков О.А. Стационарні стани у 1D моделі системи неупругих частинок. //Укр. фіз. журн. – 2008. – Т.53, №11.-С.1129-1137.
7. Герасимов О.І. Структура та динаміка гранульованих матеріалів. //Доповіді НАН України.-2010.-№11.-С.59-65.
8. Gerasymov O.I. Structure and dynamics of granular materials perturbed by external fields. //Ukr.Journ.Phys.-2010.-Vol.55, №5.-P.560-567.
9. Герасимов О.І., Сомов М.М. Локальна структура гранульованих матеріалів. //Вісник ОДЕКУ.-2010.-№10.-С.221-225.
10. Герасимов О.І., Снівак А.Я. Кінетична дисперсійна модель середнього поля для ущільнення гранульованих матеріалів. //Вісник ОДЕКУ.-2010.-№9.-С.190-197.
11. Герасимов О.І., Снівак А.Я. Кінетична модель ущільнення у гранульованих матеріалах. //Вісник ОДЕКУ.-2010.-№10.-С.266-231.
12. Герасимов О.І. О новом классе точных решений дифференциально-разностного уравнения движения для механических возмущений в одномерной неоднородной гранулированной цепочке. //Вісник ОДЕКУ.-2011.-№11.-С.198-202.
13. Герасимов О.І., Сомов М.М. Стереологічний аналіз локальної структури гранульованих матеріалів (метод Вороного). //Вісник ОДЕКУ.-2011.-№12.-С.215-219.
14. Герасимов О.І., Ванделлє Н. Щодо точних розв'язків задачі про перенесення імпульсу у неоднорідному гранульованому ланцюжку. //Доповіді НАН України.-2012.-№8.-С.67-72.
15. Герасимов О.І., Снівак А.Я. Моделювання руху механічних збуджень у одновимірних неоднорідних гранульованих ланцюжках: вплив граничних умов. //Вісник ОДЕКУ.-2012.-№14.-С.217-223.
16. Герасимов О.І., Сомов М.М. Ентропійна модель для опису вертикального профілю густини у гранульованих матеріалах у гравітаційному полі. //Вісник ОДЕКУ. – 2012.-№14.-С.224-228.

17. G. Lumay, S. Dorbolo, O. Gerasymov and N. Vandewalle, Experimental study of a vertical column of grains submitted to a series of impulses. //Eur. Phys. J. E -2013.-Vol.36, N16. (6 page) DOI 10.1140/epje/i2013-13016-1
18. Герасимов О.І., Загородній А.Г., Сомов М.М. Щодо аналізу структури гранульованих матеріалів. //Укр.фіз.журн. – 2013.-Т.58, №1.-С.32-39.
19. Gerasimov O.I., Schram P.P.J.M. Differential equation of state of a model system with a singular measure: application to granular materials in steady states. //Physica A.-2002.-312.-P.172-180.
20. Gerasimov O.I., Schram P.P.J.M, Kitahara K. Kinetics of granular segregation. //Ukr.Journ.Phys.-2003.- Vol.48, N8.-P.885-896.
21. Gerasymov O.I., Khudintsev N.N., Klymenkov O.A., Spivak A.Ya. The kinetics of processes occurring in granular materials in the field of vibroaccelerations. //Ukr.Journ.Phys. -2005.- Vol.50, №6. -P.624-632.
22. Gerasymov O.I., Khudyntsev N.N., Klymenkov O.A., Spivak A.Ya. Kinetics of driven granular materials. //Bogolyubov Kyiv Conference: Modern Problems of Mathematics and Theoretical Physics (13-17 September 2004, Kyiv, Ukraine). -P.63.
23. Герасимов О.І. Гранульована матерія: складне в простому. //Вісник ОДЕКУ.-2005.-№1.- С.206-212.
24. Герасимов О.І. Гранульовані матеріали у довкіллі. //Причорноморський екологічний бюлетень. Одеса. -2007.-.№2(24) С.157-166.
25. Hansen J.-P., Mcdonald J. Theory of simple liquids. London: Academic Press, 1986. – 600 p.

#### **Фізика гранульованих матеріалів: стан та перспективи досліджень. Частина 1.**

**Герасимов О.І.**

*Робота починає серію статей, які присвячені огляду стану досліджень у актуальному, який стрімко розвивається, напрямку сучасної фізики м'якої матерії: фізиці гранульованих матеріалів, що виявляють унікальні, проміжні по відношенню до відомих агрегатних станів: газів, рідин, аморфних та твердих тіл та є по суті складними, багаточастинковими, суттєво нелінійними, динамічними дисипативними мікромеханічними системами.*

*У частині першій наведені деякі типові, часто екстраординарні як структурні так і динамічні властивості, а також обговорюються окремі напрямки їх досліджень. Дискутуються проблеми та перспективи розвитку загальної теорії та методів фізичного та чисельного моделювання таких матеріалів, їх адекватність, а також намічуються теми та питання, які планується висвітлювати у наступній серії оглядів.*

**Ключові слова:** динамічні дисипативні системи, м'яка матерія, гранульовані матеріали.

#### **Physics of granular materials: state and perspective of investigations. Part 1.**

**Gerasymov O.I.**

*By present paper we open the set of reviews concerned the study of structure and dynamic properties of nonequilibrium, dissipative, nonlinear systems – granular materials which has a wide applications in science and industry. The focus as it is planned will be done on overview of observed specific properties (like compaction, segregation, inelastic collapse, dynamic phase transitions and some other) and their physical modeling superimposed with the numerical simulations and in some cases with the direct physical experiments. The influence of inelasticity of the intergrain collisions, as well as initial and boundary effects and relevant constitutive relations will be also outlined. The present first part of review is related to outline of most specific properties which display granular materials subjected into particular conditions.*

**Key words:** dynamic dissipative systems, soft matter, granular material.

**О.Ю. Хецелиус, д.ф.-м.н.**

*Одесский государственный экологический университет*

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ АТТРАКТОРА И НЕЙРОСЕТЕВОГО ПОДХОДА**

*Предложен принципиально новый подход к нелинейному моделированию и прогнозированию хаотических процессов в геофизических и экологических системах, который базируется на использовании концепции компактного геометрического аттрактора и нейросетевых (искусственный интеллект) алгоритмов. Предложенный метод может быть использован, в частности, при построении моделей кратко- и среднесрочного прогноза эволюции концентраций загрязняющих атмосферу промышленного города веществ.*

**Ключевые слова:** геофизические и экологические системы, хаотические процессы, прогноз, концепция аттрактора, нейросетевой алгоритм

**Введение.** К настоящему времени очевидным является тот факт, что подавляющее число так называемых геофизических, экологических и т.д. систем, или, говоря более формально, систем, изучаемых науками о Земле, являются очень сложными, причем эта особенность проявляется на различных пространственных и временных масштабных уровнях [1-8]. В связи с этим изучение их фундаментальных свойств до сих пор оказывается далеким от удовлетворительного уровня. В качестве примера задач, решение которых лежит в сфере рассматриваемой в статье проблематики, следует отметить анализ и прогноза влияния антропогенной нагрузки на состояние атмосферы промышленного города, разработку адекватных схем моделирования свойств полей концентраций загрязняющих воздушный бассейн промышленного города [8-13]. Естественно, перечень задач изучения динамики сложных систем не ограничивается приведенными выше примерами. Нетрудно понять, что примерами подобных систем являются атмосфера, турбулентные потоки в различных средах, физико-химические системы, биологические популяции, наконец, общество как система коммуникаций и его подсистемы: экономические, политические и другие социальные системы [14-28].

Ключевым, фундаментальным вопросом при описании динамики ее системы является возможность прогноза ее эволюции в будущем, т.е. предсказуемость поведения. В последнее время активно развивается теория динамических систем, и, в частности, приложения методов этой теории к анализу сложных систем, предусматривающие описание их эволюционной динамики системой дифференциальных уравнений. Чем сложнее устроена система, тем больше уравнений необходимо для ее адекватного описания. В то же время, известны примеры систем, описываемых, вообще говоря, небольшим количеством уравнений, но демонстрирующие весьма сложное поведение. Вероятно, самыми известными примерами таких систем являются система Лоренца, бильярд Синая и др. Они описываются, скажем, тремя уравнениями (т.е. в рассмотрение включены 3 независимые переменные), но динамика их поведения во времени демонстрирует элементы хаоса (т.н. «детерминированный хаос»). В частности, Лоренцу удалось выявить причину хаотического поведения системы, связанного с разницей в начальных условиях. Даже микроскопическое отклонение двух систем в самом начале в процессе эволюции приводит к экспоненциальному накоплению ошибок и соответственно их стохастическому расхождению (как следствие, к невозможности в метеорологии точного предсказания изменений погоды на достаточно длительный срок). При анализе наблюдаемой динамики изменения некоторых характеристических параметров систем

во времени достаточно сложно сказать, к какому классу принадлежит данная система и какой будет ее эволюция в будущем. Для анализа временных рядов фундаментальных динамических параметров в последние годы активно с той или иной степенью успеха разрабатываются и применяются различные методы, в частности, нелинейный спектральный и трендовый анализ, исследования Марковских цепей, wavelet и мультифрактальный анализ, формализм матриц памяти и метод эволюционных пропагаторов и т.д. Большинство из искомых подходов определяют как методы теории хаоса. В теории динамических систем разработаны методы, позволяющие по записи временного ряда одного из параметров восстановить некоторые динамические характеристики всей системы. Анализ временных рядов характеристик геофизических, экологических и т.д. систем в последние годы посвящается значительное число работ, в том числе, анализ с позиции теории динамических систем и хаоса, фрактальных множеств [1-8]. В серии работ [8-13] была сделана попытка применить некоторые из указанных методов при решении ряда экологических и гидродинамических задач. В частности, речь идет о анализе и прогнозе влияния антропогенной нагрузки на состояние атмосферы промышленного города и разработке новой количественной схемы моделирования характеристик полей концентраций загрязняющих воздушный бассейн веществ на основе методов теории хаоса. Важный результат, касающийся временных изменений концентраций двуоксида азота, сернистого ангидрида, пыли и т.д. в атмосфере ряда промышленных городов, состоит в том, что система (воздушный бассейн) демонстрирует проявления низкоразмерного хаоса. В связи с этим возникает крайне важная задача развития новых, более эффективных подходов к нелинейному моделированию и прогнозированию хаотических процессов в геофизических и экологических системах. В данной статье намерен один из возможных вариантов такого подхода, который базируется на использовании концепции компактного геометрического аттрактора и нейросетевых (искусственный интеллект) алгоритмов. Разумеется, в рамках применения методов теории хаоса, предварительно решается ряд задач, связанных с исследованием временных рядов концентраций загрязняющих веществ, проведением теста на наличие хаоса в системе, восстановлением мультифрактального спектра, спектра размерностей Ляпунова, размерности Каплана-Йорка, энтропии Колмогорова, т.д. и, наконец, заключительный этап включает в себя построения модели краткосрочного прогноза, в нашем случае экологического состояния атмосферы города (см., напр., [8,9]).

**Схема построения новой модели прогноза.** Основная идея построения нашей модели прогнозирования хаотических свойств сложных систем состоит в использовании традиционной концепции компактного геометрического аттрактора, на котором эволюционируют данные измерений, плюс имплементация нейросетевых алгоритмов. Существующие к настоящему времени в теории хаоса модели прогноза основываются именно на концепции аттрактора и описаны в целом ряде работ (см., напр., [1-8,16-25]). Смысл концепции состоит фактически в изучении эволюции аттрактора в фазовом пространстве системы и в определенном смысле моделирование («угадывание») временной эволюции. С математической точки зрения [16], речь идет о том, что в фазовом пространстве системы некоторая орбита непрерывно сворачивается на саму себя вследствие действия диссипативных сил и нелинейной части динамики, поэтому оказывается возможным нахождение в окрестности любой точки орбиты  $y(n)$  других точек орбиты  $y^r(n)$ ,  $r = 1, 2, \dots, N_B$ , которые прибывают в окрестность  $y(n)$  в полностью различающиеся времена, отличные от  $n$ . Разумеется, далее можно пытаться строить различные виды интерполяционной функции, которые учитывают все окрестности фазового пространства и одновременно поясняют как эти окрестности эволюционируют от  $y(n)$  к всему семейству точек около  $y(n+1)$ . Использование информации о фазовом пространстве при моделировании эволюции некоторого геофизического (экологического и т.д.) про-



цесса во времени может рассматриваться как фундаментальный элемент в моделировании хаотических процессов. С точки зрения современной теории нейронных систем и нейроинформатики (см., напр., [28]) процесс моделирования эволюции системы можно описать некоторым обобщенными эволюционными динамическими нейроуравнениями (уравнениями миемодинамики). Имитируя далее процесс эволюции сложной системы как эволюции соответствующей нейросети с элементами самообучения, самоадаптации и т.д., возникает возможность существенного улучшения качества прогнозирования эволюционной динамики хаотической системы. Рассматривая нейросеть (в нашем случае, уместен термин «геофизическая» нейросеть) с определенным числом нейронов, как обычно, можно ввести в рассмотрение синаптические операторы  $S_{ij}$  нейрона  $u_i$  на нейроне  $u_j$ , причем соответствующая синаптическая матрица сводится к числовой матрице сил синаптических связей:  $W = \|w_{ij}\|$ . Оператор активации описывается стандартным нейроуравнением, определяющим формально эволюцию нейросети во времени:

$$s'_i = \text{sign}\left(\sum_{j=1}^N w_{ij} s_j - \theta_i\right), \quad (1)$$

где  $1 < i < N$ . Разумеется, возможны и более сложные варианты записи уравнений эволюции нейросети. Для нас принципиальным является другой доказанный факт, связанный с информационным поведением нейродинамической системы. С точки зрения теории хаотических динамических систем, состояние нейрона (хаос-геометрическая интерпретация сил синаптического взаимодействия и т.д.) могут быть изображены токами в фазовом пространстве системы, топологическая структура которого определяется, очевидно, числом и положением аттракторов. Для определения асимптотического поведения системы принципиально важным становится информационный аспект проблемы, а именно, факт принадлежности ее начального состояния к бассейну притяжения определенного аттрактора. Моделируя каждый геофизический аттрактор некоторой записью в памяти, процесс эволюции нейросистемы, т.е. перехода из начального состояния в (последующие) конечное состояние представляет собой модель реконструкции по искаженной информации полной записи, т.е. модель ассоциативного распознавания образа. Области притяжения различных аттракторов при этом разделены сепаратрисами, т.е. определенными поверхностями в фазовом пространстве, структура которых, разумеется, является достаточно сложной, однако имитирует свойства изучаемого хаотического объекта. Тогда, как обычно, следующий естественный шаг заключается в построении параметризованных нелинейных функции  $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{a})$ , которые преобразовывают  $\mathbf{y}(n)$  в  $\mathbf{y}(n+1) = \mathbf{F}(\mathbf{y}(n), \mathbf{a})$ , а затем использовать различные, в том числе, нейросетевые критерии для определения параметров  $\mathbf{a}$  (см. ниже). Проще всего эту программу реализовать, рассматривая изначально локальные окрестности, т.е. вводить модель (модели) процесса, происходящего в окрестности, по самой окрестности и, комбинируя вместе эти локальные модели, конструируя далее глобальную нелинейную модель, описывающую большую часть структуры самого аттрактора. Хотя, согласно классической теореме Колмогорова-Арнольда-Мозера, динамика эволюционируют в многомерном пространстве, размер и структура которого предопределяется начальными условиями, это, однако, не дает указания функционального выбора модельных элементов в полном соответствии с источником хаотических данных. Одной из наиболее распространенных форм локальной модели является модель типа модели Шрейбера [19], которая в обобщенном нами варианте имеет вид

$$s(n + \Delta n) = a_0^{(n)} + \sum_{j=1}^{d_A} a_j^{(n)} s(n - (j-1)\tau), \quad (2)$$

где  $\Delta n$  – временной интервал, на который дается прогноз. Коэффициенты  $a_j^{(n)}$  обычно

пытаются определить на основе того или иного метода вариационного исчисления, в частности, в простейшем варианте это можно сделать методом наименьших квадратов, учитывая только те точки, которые находятся внутри окрестности небольших размеров точки  $s(n)$ . Разумеется, тогда коэффициенты будут изменяться по всему фазовому пространству, а процедура подгонки фактически эквивалентна решению  $(d_A + 1)$  линейных уравнений с  $(d_A + 1)$  неизвестными [14]. Уместно напомнить, что в этом случае данные, которые используются при подгонке, обычно охватывают локально не все доступные размерности, а только некое подпространство. Естественно, тогда ясно, что линейная система подгоночных уравнений плохо обусловлена, и, кроме того, при наличии шума в принципе могут возникнуть «нефизические» решения, относящиеся к «направлению» шума к будущим точкам.

Работая в рамках модели Шрейбера [19], как обычно, можно задать функциональную форму отображения, используя, скажем, полиномиальные базисные функции. Характеристику, которая является мерой качества подгонки кривой к данным, определяют из условия, насколько точно совпадают  $\mathbf{y}(k + 1)$  с  $\mathbf{F}(\mathbf{y}(k), \mathbf{a})$ , и обычно называют локальной детерминистической ошибкой

$$\varepsilon_D(k) = \mathbf{y}(k + 1) - \mathbf{F}(\mathbf{y}(k), \mathbf{a}). \quad (3)$$

Если отображение  $\mathbf{F}(\mathbf{y}, \mathbf{a})$  является локальным, то для каждой соседней к  $\mathbf{y}(k)$  точки,  $\mathbf{y}^{(r)}(k)$  ( $r = 1, 2, \dots, N_B$ ) можно записать

$$\varepsilon_D^{(r)}(k) = \mathbf{y}(r, k + 1) - \mathbf{F}(\mathbf{y}^{(r)}(k), \mathbf{a}), \quad (4)$$

где  $\mathbf{y}(r, k + 1)$  – точка в фазовом пространстве, к которой эволюционирует  $\mathbf{y}(r, k)$ . Для меры качества подгонки кривой к данным, локальная функция стоимости имеет вид (фактически, функция стоимости для ошибки):

$$W(\varepsilon, k) = \frac{\sum_{r=1}^{N_B} |\varepsilon_D^{(r)}(k)|^2}{\sum_{r=1}^{N_B} [\mathbf{y}(k) - \langle \mathbf{y}(r, k) \rangle]^2}, \quad (5)$$

а параметры, определенные посредством минимизации  $W(\varepsilon, k)$ , будут зависеть от  $\mathbf{a}$ . Далее, формально, запускается нейросетевой алгоритм, в частности, в аспекте обучения эквивалентной системе нейросети с реконструкцией и временным прогнозом состояния нейросистемы (соответственно, корректировки значений коэффициентов  $a_j^{(n)}$ ). Исходным является формальное знание временных рядов основных динамических параметров хаотической системы и далее определение вектора состояния, матрицы синаптического взаимодействия  $\|w_{ij}\|$  и т.д. Разумеется, основная сложность здесь заключается именно в реализации процесса самообучения нейросети с целью полной имитации процесса изменений в топологической структуре фазового пространства системы и использования выходных результатов работы нейросети для корректировки коэффициентов функционального отображения. Сложность этой локальной задачи, однако, очевидно, существенно меньше сложности изначальной задачи прогноза хаотических процессов в геофизической или какой-либо другой динамической системы.

**Вывод.** Итак, предложенный в данной работе новый подход к нелинейному моделированию и прогнозированию хаотических процессов в геофизических и экологи-

ческих системах базируется на двух ключевых функциональных элементах. Помимо использования других стартовых элементов теории хаоса, в основе подхода лежит применение концепции компактного геометрического аттрактора и одного из нейросетевых алгоритмов, или, в более общем определении, той или иной модели искусственного интеллекта. Смысл применения последней состоит именно в нейросетевой имитации эволюции аттрактора в фазовом пространстве и обучении самой нейросети с целью предсказывать (точнее, корректировать) необходимые коэффициенты параметрической формы функционального отображения.

В заключение подчеркнем, что предложенный метод, разумеется, может быть применен при решении широкого круга геофизических и прикладных экологических задач, и, в частности, при построении моделей прогноза эволюции концентраций загрязняющих атмосферы промышленного города веществ.

### Список литературы

1. *Sivakumar B.* Chaos theory in geophysics: past, present and future // *Chaos, Solitons & Fractals*.-2004.-Vol.19.-P.441-462.
2. *Лукк А.А., Децеровский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А.* Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде.- Москва: ОИФЗ РАН, 1996.-280с.
3. *Turcotte D.L.* Fractals and chaos in geology and geophysics. – Cambridge: Cambridge University Press, 1997.- 340p.
4. *Hastings A.M., Hom C., Ellner S, Turchin P., Godfray Y.* Chaos in ecology: is Mother Nature a strange attractor? // *Ann. Rev. Ecol. Syst.*-1993.-Vol.24.-P.1-33.
5. *May R.M.* Necessity and chance: deterministic chaos in ecology and evolution// *Bull. Amer. Math. Soc.*-1995.-Vol.32.-P.291-308.
6. *Blasius B., Stone L.* Chaos and phase synchronization in ecological systems// *Int. J. Bifurcat. Chaos*.-2000.-Vol.10.-P.2361-2380.
7. *Letellier C., Aziz-Alaoui M.* Analysis of the dynamics of a realistic ecological model// *Chaos, Solitons and Fractals*.-2002.-Vol.13.-P.95-107.
8. *Бунякова Ю.Я., Глушков А.В.* Анализ и прогноз влияния антропогенных факторов на воздушный бассейн промышленного города.- Одесса: Экология, 2010.-256с.
9. *Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Prepelitsa G.P., Tsenenko I.A.* Temporal variability of the atmosphere ozone content: Effect of North-Atlantic oscillation// *Optics of atmosphere and ocean*.-2004.-Vol.14.-P.219-223
10. *Glushkov A.V., Loboda N.S., Khokhlov V.N.* Using meteorological data for reconstruction of annual runoff series over an ungauged area: Empirical orthogonal functions approach to Moldova-Southwest Ukraine region//*Atmospheric Research (Elsevier)*.-2005.-Vol.77.-P.100-113.
11. *Глушков А.В., Хохлов В.Н., Сербов Н.Г, Бунякова Ю.Я, Балан А.К., Баланюк Е.П.* Низко-размерный хаос во временных рядах концентраций загрязняющих веществ в атмосфере и гидросфере// *Вестник Одесского гос. экологического ун-та*.-2007.-N4.-С.337-348.
12. *Khokhlov V.N., Glushkov A.V., Loboda N.S., Bunyakova Yu.Ya.* Short-range forecast of atmospheric pollutants using non-linear prediction method// *Atmospheric Environment (Elsevier)*.-2008.-Vol.42.-P.7284-7292.
13. *Глушков А.В., Хецелиус О.Ю., Амбросов С.В., Бунякова Ю.Я., Мансарлийский В.Ф.* Применение микросистемной технологии “Geomath” к моделированию баланса углового момента земли, параметров атмосферных процессов и радиоволноводов: Элементы нестационарной теории//*Sensor Electronics and Microsystems Technologies*.-2013.-Vol.10,N1-P.22-28.
14. *Арнольд В.И.* Математические методы классической механики.- М.: Наука, 1979. - 380с.
15. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы: Пер. с англ.– М.: Институт ком-

- пьютерных исследований, 2002.-656с.
16. *Lichtenberg A., Liebermann A.* Regular and chaotic dynamics.– N.-Y.: Springer, 1992.-482p.
  17. *Abarbanel H.* Analysis of observed chaotic data.- N.-Y.: Springer, 1996.-288p.
  18. *Ott E.* Chaos in dynamical systems. – Cambridge: CUP, 2002.- 490p.
  19. *Schreiber T.* Interdisciplinary application of nonlinear time series methods // Physics Rep. - 1999.-Vol.308.-P.1-64.
  20. *Fraser A.M., Swinney H.* Independent coordinates for strange attractors from mutual information// Phys. Rev. A.-1986.-Vol. 33.-P.1134-1140.
  21. *Grassberger P., Procaccia I.* Measuring the strangeness of strange attractors// Physica D.- 1983.-Vol.9.-P.189-208.
  22. *Kennel M., Brown R., Abarbanel H.* Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction// Phys. Rev. A.-1992.-Vol.45.- P.3403-3411.
  23. *Gottwald G.A., Melbourne I.* A new test for chaos in deterministic systems// Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. Mathemat. Phys. Sci.-2004.-Vol.460.-P.603-611.
  24. *Packard N.H., Crutchfield J.P., Farmer J.D., Shaw R.S.* Geometry from a time series// Phys. Rev. Lett.-1980.-Vol.45.-P.712-716.
  25. *Abarbanel H.D.I., Brown R., Sidorowich J.J., Tsimring L.Sh.* The analysis of observed chaotic data in physical systems // Rev. Mod. Phys.-1993.-Vol.65.-P.1331-1392.
  26. *Mañé R.* On the dimensions of the compact invariant sets of certain non-linear maps// Dynamical systems and turbulence, Warwick 1980. Lecture Notes in Mathematics No. 898 / D.A. Rand, L.S. Young (Eds.). - Berlin: Springer, 1981.- P.230-242.
  27. *Takens F.* Detecting strange attractors in turbulence // Dynamical systems and turbulence, Warwick 1980. Lecture Notes in Mathematics No. 898 / D.A. Rand, L.S. Young (Eds.). – Berlin: Springer, 1981.-P.366-381.
  28. *Глушков А.В., Лобода А.В., Свинарченко А.А.* Теория нейронных сетей на основе фотонного эха и их программная реализация.- Одесса: ТЕС, 2003.-176с.

**Прогнозування хаотичних процесів в геофізичних та екологічних системах на основі концепції аттрактора і нейромережевого підходу. Хецеліус О.Ю.**

*Запропоновано новий підхід до нелінійного моделювання і прогнозування хаотичних процесів в геофізичних та екологічних системах, який базується на концепції компактного геометричного аттрактора і нейромережевих (штучний інтелект) алгоритмах. Запропонований метод може бути використаний, зокрема, при побудові моделей коротко-та середньострокового прогнозу еволюції концентрації забруднюючих атмосферу промислового міста речовин.*

**Ключові слова:** геофізичні та екологічні системи, хаотичні процеси, прогноз, концепція аттрактора, нейромережевий алгоритм

**Forecasting chaotic processes in geophysical and ecological systems on the basis of attractor conception and neural networks approach. Khetselius O.Yu.**

*It is proposed a new approach to non-linear modeling and forecasting chaotic processes in geophysical and ecological systems, which is based on the conception of compact geometrical attractor and neural networks (artificial intellect) algorithms. In particular, the proposed approach can be used in a short-and middle-termed forecasting air pollutants concentration evolution in atmosphere of an industrial city.*

**Keywords:** geophysical and ecological systems, chaotic processes, forecasting, attractor conception, neural networks algorithm

## СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ КРАУН-ЭФИРОВ С 1H-ИМИДАЗОЛ-4,5-ДИКАРБОНИТРИЛОМ, 3-НИТРО-1,2,4-ТРИАЗОЛОМ И 1H-ТЕТРАЗОЛОМ

*Взаимодействием 1H-имидазол-4,5-дикарбонитрила, 3-нитро-1,2,4-триазола и 1H-тетразола, содержащих по одному протону при двух соседних протонодонорных атомах разделенных одной ковалентной связью, с краун-эфиром показана возможность получения кристаллических нейтральных супрамолекулярных соединений за счет протонодонорных свойств ароматических гетероциклов.*

**Ключевые слова:** 1H-имидазол-4,5-дикарбонитрил, 3-нитро-1,2,4-триазол, 1H-тетразол, кристаллические супрамолекулярные соединения, гетероциклы, краун-эфиры.

**Введение.** Синтез и исследование супрамолекулярных соединений образованных посредством не ковалентных взаимодействий является актуальной задачей. В связи с ключевой ролью гетероциклов в биохимических процессах и для учета матричных контактов в системах «объект–субстрат» таких взаимодействий, в последние годы активизировалось изучение строения гетероциклов в составе супрамолекулярных соединений с полостными молекулами [1,2].

Непрерывным условием образования кристаллических супрамолекулярных соединений [1,2] краун-эфиров с органическими молекулами является присутствие в последних протонодонорных центров при одном С, N или O – атомах, в частности  $\text{H}_2\text{N}-$ ,  $\text{H}_2\text{NSO}_2-$ ,  $\text{H}_2\text{NCS}-$ ,  $\text{H}_2\text{NHNCO}-$ ,  $\text{H}_2\text{C}=\text{}$ ,  $\text{H}_3\text{C}-$ ,  $\text{CH}_3\text{O}-$  и аналогичных групп или молекул воды [1-3], обеспечивающих стабилизацию компонент супрамолекулярного соединения водородными связями. В связывании, как правило, участвует пара протонов заместителя, причем стабильность соединений падает в ряду:  $\text{OH}_2 > \text{NH}_2 > \text{CH}_2$  [4]. Кристаллические супрамолекулярные соединения краун-эфиров с гетероциклами стабилизированы водородными связями за счет либо одного из перечисленных экзо-циклических заместителей при гетероцикле [5-12], либо – циклической аммонийной группы протонированного гетероцикла [13]. Известен единичный пример образования кристаллического супрамолекулярного соединения наиболее эффективного [3,14] краун-эфира (**1 b**) с незамещенным триазолом [15].

Целью работы являлось определение возможности синтеза незаряженных кристаллических супрамолекулярных соединений краун-эфиров различного строения с пятичленными ароматическими гетероциклами, имеющими по одному протону при двух соседних протонодонорных атомах разделенных одной ковалентной связью, и обеспечивающих стабилизацию супрамолекулярного соединения лишь парой протонов ароматического гетероцикла, аналогично данным [14].

**Материалы и методы их исследования.** Спектры ЯМР  $^1\text{H}$  регистрировали на приборе Bruker AC 300 (300 МГц) в ацетоне- $\text{d}_6$ , внутренний стандарт – ТМС. ТСХ проведен на пластинах Silufol, элюент метанол–хлороформ, 1:8, с проявлением нингидрином при 200 °С. При ТСХ образцы разрушаются и гетероциклы (**4-6**) проявляются темно-красными, краун-эфиры (**1-3**) – серыми пятнами на розовом фоне. Краун-эфир (**3**) получен как описано в работе [17], соединения (**1,2,4-6**) использованы коммерческие, фирмы Aldrich, без дополнительной очистки.

**Супрамолекулярные соединения (7-14).** К 0.220 г (1 ммоль) краун-эфира (**1a**), 0.264 г (1 ммоль) – (**1b**), 0.312 г (1 ммоль) – (**2**) или 0.372 г (1 ммоль) – (**3**) добавляют

раствор 0.118 г (1 ммоль) гетероцикла (4), 0.114 г (1 ммоль) – (5) или 0.070 г (1 ммоль) – (6) в смеси ацетон/гексан, 1:1 и оставляют испаряться при 20 °С. Выделившиеся монокристаллы отделяют, промывают той же смесью растворителей и сушат на воздухе.

**Соединение 1,4,7,10,13,16-гексаоксациклооктадекана с 1*H*-имидазол-4,5-дикарбонитрилом, 1:1 (7).** Получают 0.35 г (91%). Т. пл. 146–147 °С. Спектр ЯМР <sup>1</sup>H, δ, м. д.: 3.58 (24H, с, CH<sub>2</sub>O), 8.29 (1H, с, CH). Найдено, %: C = 53.44; H = 6.89; N = 14.63. C<sub>12</sub>H<sub>24</sub>O<sub>6</sub> • C<sub>5</sub>H<sub>2</sub>N<sub>4</sub>. Вычислено, %: C = 53.39; H = 6.85; N = 14.65.

**Соединение 2,3,5,6,8,9,11,12,14,15-декагидро-1,4,7,10,13,16-бензогексаоксациклооктадецина с 1*H*-имидазол-4,5-дикарбонитрилом, 1:1 (8).** Получают 0.4 г (92%). Т. пл. 87–80 °С. Спектр ЯМР <sup>1</sup>H, δ, м. д.: 3.58, 3.61, 4.11 (20H, м, CH<sub>2</sub>O), 6.88 м (4H, м, CH – Ar), 8.27 (1H, с, CH). Найдено, %: C = 58.28; H = 6.17; N = 12.83. C<sub>16</sub>H<sub>24</sub>O<sub>6</sub> • C<sub>5</sub>H<sub>2</sub>N<sub>4</sub>. Вычислено, %: C = 58.59; H = 6.09; N = 13.02.

**Соединение *цис-анти-цис* эйкосагидродибензо[*b,k*][1,4,7,10,13,16]гексаоксациклооктадецина с 1*H*-имидазол-4,5-дикарбонитрилом, 1:2 (9).** Получают 0.29 г (96%). Т. пл. 155–156 °С. Спектр ЯМР <sup>1</sup>H, δ, м. д.: 1.24-1.81, 3.59 (36H, м, CH<sub>2</sub>O, CH<sub>2</sub>, CH), 8.24 (2H, с, CH). Найдено, %: C = 59.24; H = 6.59; N = 18.47. C<sub>20</sub>H<sub>36</sub>O<sub>6</sub> • 2C<sub>5</sub>H<sub>2</sub>N<sub>4</sub>. Вычислено, %: C = 59.20; H = 6.62; N = 18.41.

**Соединение 1,4,7,10,13-пентаоксациклопентадекана с 3-нитро-1,2,4-триазолом, 1:1 (10).** Получают 0.3 г (90%). Т. пл. 110–112 °С. Спектр ЯМР <sup>1</sup>H, δ, м. д.: 3.53 (20H, с, CH<sub>2</sub>O), 8.86 (1H, с, CH). Найдено, %: C 43.15; H 6.61; N 16.84. C<sub>10</sub>H<sub>20</sub>O<sub>5</sub> • C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>N<sub>4</sub>O<sub>2</sub>. Вычислено, %: C 43.11; H 6.63; N 16.76.

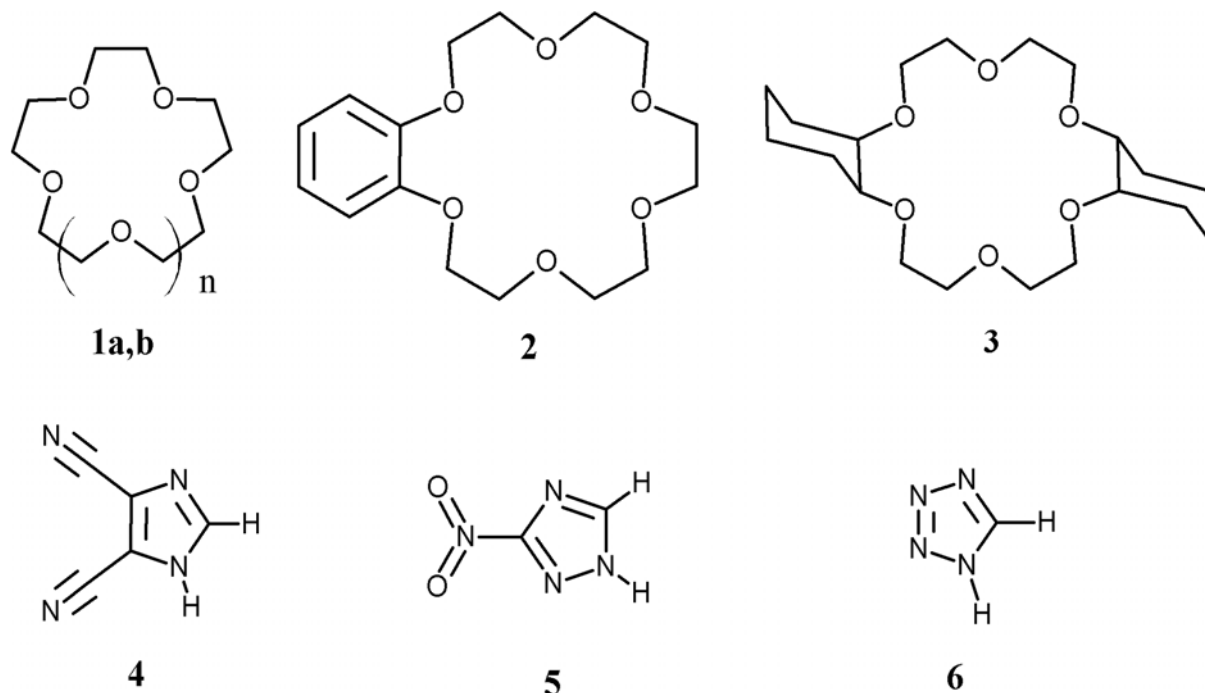
**Соединение 1,4,7,10,13,16-гексаоксациклооктадекана с 3-нитро-1,2,4-триазолом, 1:2 (11).** Получают 0.215 г (88%). Т. пл. 184–186 °С. Спектр ЯМР <sup>1</sup>H, δ, м. д.: 3.50 (24H, с, CH<sub>2</sub>O), 8.86 (2H, с, CH). Найдено, %: C 39.11; H 5.76; N 22.84. C<sub>12</sub>H<sub>24</sub>O<sub>6</sub> • 2C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>N<sub>4</sub>O<sub>2</sub>. Вычислено, %: C 39.03; H 5.73; N 22.75.

**Соединение 2,3,5,6,8,9,11,12,14,15-декагидро-1,4,7,10,13,16-бензогексаоксациклооктадецина с 3-нитро-1,2,4-триазолом, 1:2 (12).** Получают 0.22 г (81%). Т. пл. 94–96 °С. Спектр ЯМР <sup>1</sup>H, δ, м. д.: 3.58, 3.72, 4.05 (20H, м, CH<sub>2</sub>O), 6.88 (4H, м, CH – Ar), 8.86 (2H, с, CH). Найдено, %: C 44.41; H 5.28; N 20.77. C<sub>16</sub>H<sub>24</sub>O<sub>6</sub> • 2C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>N<sub>4</sub>O<sub>2</sub>. Вычислено, %: C 44.45; H 5.22; N 20.73.

**Соединение *цис-анти-цис* эйкосагидродибензо[*b,k*][1,4,7,10,13,16]гексаоксациклооктадецина с 3-нитро-1,2,4-триазолом, 1:2 (13).** Получают 0.26 г (87%). Т. пл. 178–180 °С. Спектр ЯМР <sup>1</sup>H, δ, м. д.: 1.20-1.71, 3.52 (36H, м, CH<sub>2</sub>O, CH<sub>2</sub>, CH), 8.86 (2H, с, CH). Найдено, %: C 48.08; H 6.76; N 18.73. C<sub>20</sub>H<sub>36</sub>O<sub>6</sub> • 2C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>N<sub>4</sub>O<sub>2</sub>. Вычислено, %: C 47.99; H 6.71; N 18.66.

**Соединение *цис-анти-цис* эйкосагидродибензо[*b,k*][1,4,7,10,13,16]гексаоксациклооктадецина с 1*H*-тетразолом, 1:2 (14).** Получают 0.22 г (86%). Т. пл. 140–142 °С. Спектр ЯМР <sup>1</sup>H, δ, м. д.: 1.23-2.05, 3.59 (36H, м, CH<sub>2</sub>O, CH<sub>2</sub>, CH), 9.19 (2H, с, CH). Найдено, %: C = 51.51; H = 7.83; N = 21.82. C<sub>20</sub>H<sub>36</sub>O<sub>6</sub> • 2CH<sub>2</sub>N<sub>4</sub>. Вычислено, %: C = 51.54; H = 7.87; N = 21.87.

**Результаты исследования и их анализ.** Установлено, что при самопроизвольном испарении растворителей из растворов краун-эфиров (1-3) с гетероциклами (4-6) образуются кристаллические супрамолекулярные соединения – [(1b) • (4)] – (7), [(2) • (4)] – (8), [(3) • 2(4)] – (9), [(1a) • (5)] – (10), [(1b) • 2(5)] – (11), [(2) • 2(5)] – (12), [(3) • 2(5)] – (13), [(3) • 2(6)] – (14) соответственно.



**1a**,  $n = 1$ , **b**  $n = 2$ ;

**1a** – 1,4,7,10,13-пентаоксациклопентадекан, **1b** – 1,4,7,10,13,16-гексаоксациклооктадекан;

**2** – 2,3,5,6,8,9,11,12,14,15-декагидро-1,4,7,10,13,16-бензогексаоксациклооктадецин;

**3** – *цис-анти-цис* эйкосагидрибензо[*b,k*][1,4,7,10,13,16]гексаоксациклооктадецин;

**4** – 1*H*-имидазол-4,5-дикарбонитрил; **5** – 3-нитро-1,2,4-триазол; **6** – 1*H*-тетразол.

Из двух возможных таутомерных форм тетразола (рис. 1) в составе кристаллического супрамолекулярного соединения (**14**) фиксируется лишь одна – 1*H*-тетразол.



Рис. 1 – Таутомерные формы тетразола

В качестве примера, на рисунках 2, 3 представлено пространственное строение *цис-анти-цис* эйкосагидрибензо[*b,k*][1,4,7,10,13,16]гексаокса-циклооктадецина с 1*H*-имидазол-4,5-дикарбонитрилом (**9**) и *цис-анти-цис* эйкосагидрибензо[*b,k*][1,4,7,10,13,16]гексаокса-циклооктадецина с 1*H*-тетразолом (**14**).

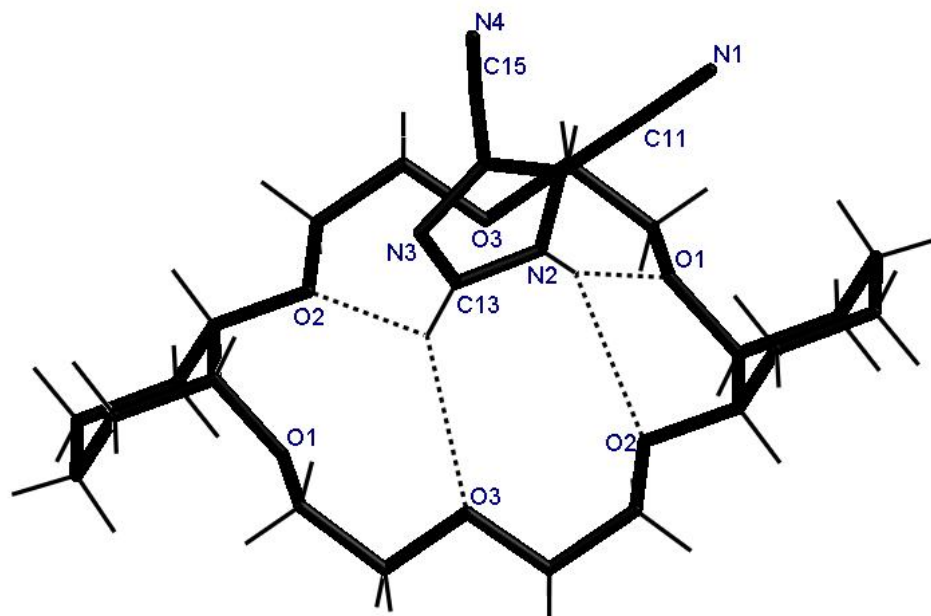


Рис. 2 – Пространственное строение супрамолекулярного соединения (9).

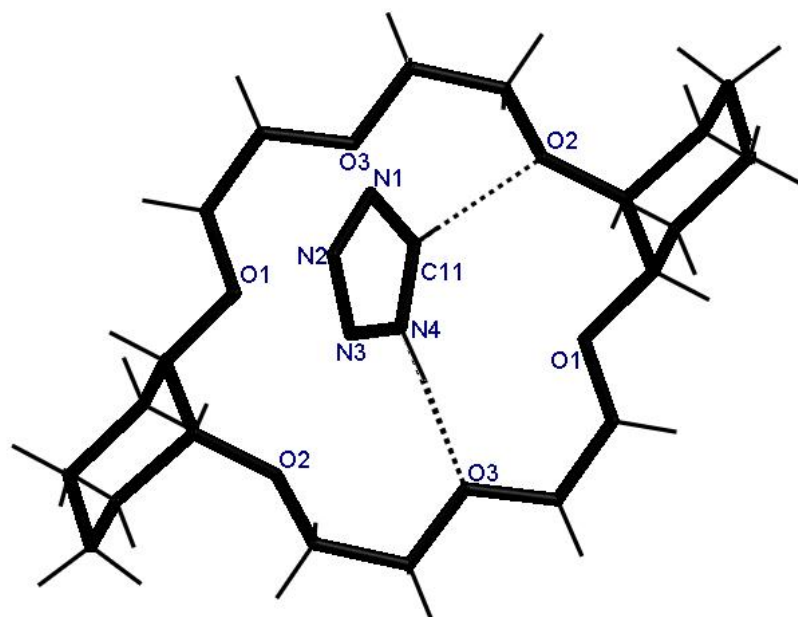


Рис. 3 – Пространственное строение супрамолекулярного соединения (14).

Связь компонент в комплексах (рис. 2, 3) осуществляется водородными связями (пунктирные линии) за счет протонов имидазола и тетразола соответственно, находящихся при двух соседних С- и N-атомах гетероциклов, разделенных одной ковалентной С–N связью. Способ стабилизации компонент в супрамолекулярных соединениях (7,8, 10-13) – аналогичен.



**Выводы** Образование устойчивых кристаллических соединения нейтральных гетероциклов (**4-6**) с краун-эфирами, имеющими различный размер макроциклического кольца – соединения (**1a,b**), а также различно пространственно экранированные стороны макроциклической полости – соединения (**2-3**), позволяет полагать, что факты связывания краун-эфиров в супрамолекулярные соединения парами протонов ароматических гетероциклов носят неслучайный характер. Данные могут быть учтены при анализе и моделировании молекулярных взаимодействий незаряженных природных молекул [1,2,16], а также направленном синтезе кристаллических супрамолекулярных соединений краун-эфиров с гетероциклами.

### Список литературы

1. *Comprehensive supramolecular chemistry* / eds.: J.-M. Lehn, J. L. Atwood, J. E. D. Davies, D. D. MacNicol, F. Wogtle, Oxford – New York – Tokyo: Pergamon, 1996. – Vol. 1-11.
2. *Химия комплексов «гость-хозяин»* / Под. ред. Ф. Фегтле, Э. Вебера. – М.: Мир, 1988. – 512 с.
3. *Elbasyony A., Klimes J., Knochel A. Anionenaktivierung, III. Zur Bedeutung von Wasserstoffbrückenbindungen für das reaktive Verhalten von Kronendthern und Aminopolydthern* // *Z. Naturforsch.* – 1976. – Bd.31B, N 9. – S.1192-1200.
4. *Elbasyony A., Brugge H.J., Deuten K. Host-guest complexes of 18-crown-6 with neutral molecules possessing the structure element  $XH_2$  ( $X = O, N, C$ )* // *J. Am. Chem. Soc.* – 1983. – V.105, N 22. – P.6568-6577.
5. *Кристаллическая и молекулярная структуры комплекса 1:2 18-краун-6 с 2-ацетиламино-1,3,4-тиадиазол-5-сульфамидом* / М.С. Фонарь, А.А. Дворкин, Э.В. Ганин, С.А. Котляр, Ю.А. Симонов, Т. И. Малиновский // *Журн. общ. химии.* – 1989 – Т. 59, № 10. – С. 2302-2307.
6. *Кристаллическая и молекулярная структура комплекса 18-краун-6 с 6-хлор-7-сульфамидо-3,4-дигидро-1,2,4-бензотиадиазин-1,1-диоксидом (гипотиазидом) состава 1:1* / Дворкин А.А., Ю.А. Симонов, Я. Липковский, М.С. Фонарь, Т.И. Малиновский, Э.В. Ганин, С.А. Котляр // *Кристаллография.* – 1990. – Т. 35, № 3. – С. 682-686.
7. *Строение молекулярных комплексов 18-краун-6 с пятичленными гетероциклическими молекулами: 5-амино-1Н-тетразолом и 5-амино-1,2,3-триазолом* / Р. Люборадский, Я. Липковский, Ю.А. Симонов, М.С. Фонарь, Э.В. Ганин, А.А. Яволовский // *Кристаллография.* – 1997. – Т.41, № 1. – С. 77-87.
8. *Строение молекулярных комплексов 18-краун-6 с производными 1,2,5-оксадиазола* / М.С. Фонарь, Ю.А. Симонов, В.Х. Кравцов, Я. Липковский, А.А. Яволовский, Э.В. Ганин // *Журн. Структ. химии.* – 2001 – Т 42, № 3. – С. 550-562.
9. *Кристаллические структуры молекулярных комплексов 18-краун-6 с гидрозидами 2-аминобензойной и 5-амино-1-бенз-1,2,3-триазол-4-карбоновой кислотой* / Ю.А. Симонов, М.С. Фонарь, В.Х. Кравцов, Я. Липковский, Э.В. Ганин, А.А. Яволовский // *Кристаллография.* – 2002. – Т. 47, № 1. – С. 79-86.
10. *Layer and Chain Structures in the Co-Crystals of 18-Crown-6 with Aromatic Thiosemicarbazide Derivatives* Yu.A. Simonov, M.S. Fonari, J. Lipkowski, E.V. Ganin, A.A. Yavolovskii // *J. Supramol. Chem.* – 2002. – Т. 2. – С. 415-420.
11. *Hydrogen bonding assemblies in host-guest complexes with 18-crown-6* / M. S. Fonari, Yu.A. Simonov, V.Ch. Kravtsov, J. Lipkowski, E.V. Ganin, A.A. Yavolovskii, // *J. Molec. Struct.* – 2003. – № 647. – С. 129-140.

12. *Nitrosation* of hydrochlorothiazide and the modes of binding of the N-nitroso derivative with two macrocycles possessing an 18-membered crown ether cavity / Yu.A. Simonov, M.S. Fonari, G.G. Duca, M.V. Gonta, E.V. Ganin, A.A. Yavolovskii, M. Gdaniec, J. Lipkowski, // *Tetrahedron*. – 2005. – Т. 61 – С. 6596–6601.
13. *Kiviniemi S.*, Nissinen M., Lamsa M. T. Complexation of planar organic, five-membered cations with crown ethers // *New J. Chem.* – 2000. – V. 24. – P. 47-52.
14. *Ganin E. V.* Guest-host complexes of crown ethers. Requirements for the proton-donor molecule // *Russ. J. Gen. Chem.* – 1997. – Т. 67, №6. – С. 833-834.
15. *Structures* of the molecular complexes of 18-crown-6 with five-membered heterocyclic molecules: 5-amino-1H-tetrazole and 1,2,4-triazole / R. Luboradski, J. Lipkowski, Yu.A. Simonov, M.S. Fonar, E.V. Ganin, A.A. Yavolovskii // *Kristallografiya*. – 1997. – V. 42, № 1. – P. 77-87.
16. *Лен Ж-М.* Супрамолекулярная химия: Концепции и перспективы. – Новосибирск: Наука, 1998. – 334 с.
17. *Выделение и разделение цис-син-цис- и цис-анти-цис-диастереомеров* дициклогексано-18-краун-6 комплексобразованием с NH-кислотными органическими молекулами / Э.В. Ганин, В.Ф. Макаров, С.А. Котляр, Н.Г. Лукьяненко // *Журн. общ. химии*. – 1988. – Т.58, № 6. – С.1309-1313.

**Supramolecular compounds of 1H-imidazole-4,5-dicarbonitrile, 3-nitro-1,2,4-triazole, 1H-tetrazole with crown-ethers**

**Ganin E.V., Gerasimenko G.I., Gorlichenko M.G., Shevchenko V.F., Vasileva M.G., Shevchenko S.V.**

*The interaction of 1H-imidazole-4,5-dicarbonitrile, 3-nitro-1,2,4-triazole and 1H-tetrazole which containing one by one proton at two donor atoms and which parted by one covalent bond with crown - ethers of possibility synthesis a neutral crystal supramolecular compounds due to a proton donor properties of aromatic heterocyclic was exhibit.*

**Key words:** 1H-imidazole-4,5-dicarbonitrile, 3-nitro-1,2,4-triazole, 1H-tetrazole, crystal supramolecular compounds, heterocyclic, crown-ethers.

**Супрамолекулярні сполуки краун-етерів з 1H-імідазол-4,5-дікарбонітрилом, 3-нітро-1,2,4-триазолом й 1H-тетразолом**

**Ганін Е.В., Герасименко Г.І., Горліченко М.Г., Шевченко В.Ф., Васильєва М.Г., Шевченко С.В.**

*Взаємодією 1H-імідазол-4,5-дікарбонітрилу, 3-нітро-1,2,4-триазолу й 1H-тетразолу що містять по одному протоні при двох сусідніх протонодонорних атомах розділених одним ковалентним зв'язком, із краун-етерами показана можливість одержання кристалічних молекулярних супрамолекулярних сполук за рахунок протонодонорних властивостей ароматичних гетероциклів.*

**Ключові слова:** 1H-імідазол-4,5-дікарбонітрил, 3-нітро-1,2,4-триазол, 1H-тетразол, кристалічні супрамолекулярні сполуки, гетероцикли, краун-етери .

УДК 539.184

Лавриненко А.В., д.ф.-м.н.,\* Лавриненко Ю.В. к.т.н.

\*Белорусский государственный университет

Одесский государственный экологический университет

## ВЫБОР ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

*Статья посвящена обоснованию выбора наиболее оптимальных граничных условий, используемых при моделировании процессов в фотонно-кристаллических волноводах.*

**Ключевые слова:** алгоритм, граничные условия, диэлектрическая проницаемость, отражение, периодическая структура, плоская волна, поглощение, слой, сходимост, фотонно-кристаллический волновод.

**Введение.** Ранее в [1] было показано, что при рассмотрении наиболее существенных проблем моделирования свойств фотонных кристаллов (ФК) и фотонно-кристаллических волноводов (ФКВ) на их основе, численное моделирование в большинстве случаев целесообразно проводить, используя метод конечных разностей во временной области FDTD (finite-difference time-domain).

Алгоритм численного эксперимента с использованием FDTD метода выглядит следующим образом. Первоначально определяются – вид падающей волны и материальную структуру, рассеяние волны на которой нас интересует. Затем поля пересчитываются для последующих моментов времени. Сохраняя поля в определенном наборе точек пространственной сетки во все моменты времени, мы получаем массив значений  $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$  и  $\mathbf{H}(\mathbf{r},t)$  во временной области. Дальнейшая обработка результатов эволюции полей зависит от постановки задачи. В случае расчета спектров пропускания и отражения, нужно посредством Фурье преобразования совершить переход в частотную область  $\mathbf{E}(\mathbf{r},t) \rightarrow \mathbf{E}(\mathbf{r},\omega)$ . Коэффициенты отражения и пропускания определяются, например, через отношение соответствующих компонент вектора Пойнтинга.

Альтернативный вариант, реализующийся в программах, связан с использованием пучка плоских волн всевозможных направлений распространения в каждой точке регистрирующей поверхности. Проецируя полное поле в данной точке на каждую из плоских волн пучка, получается значение амплитуды волны идущей в данном направлении в данной точке. Суммируя квадраты модулей проекций по всем точкам по всевозможным направлениям, можно также определить коэффициенты отражения и пропускания волны, упавшей на интересующую нас структуру.

Одним из главных требований, предъявляемых к современному численному методу, является консервативность: все физические величины, не изменяющиеся в рамках конкретной физической модели должны сохраняться в ходе численной реализации алгоритма на пространственной решетке. Достоинством описанной выше схемы эволюции поля на прямоугольной сетке заключается в том, что сохраняется важнейшая характеристика волнового распространения полей — значения дивергенции полей (их равенство нулю в случае отсутствия зарядов) — по определению. Отметим, что использование уравнений Максвелла, содержащих только операторы ротора, может приводить к появлению различного рода ложных решений, обладающих отличной от нуля дивергенцией. Поэтому контроль за сохранением значений дивергенции полей (потоков через замкнутые сеточные области) является необходимым.

Поскольку программа предназначена для расчетов параметров ФК и ФКВ, имеющих большое число областей с резкими границами перехода между различными материалами, то возникает вопрос, каким образом удовлетворяются многочисленные

граничные условия на сетке. В классическом варианте схемы поля направлены по касательной на границах областей и поэтому непрерывны. Следовательно, никаких добавочных условий привлекать не надо.

В рассматриваемой коллокационной схеме на границах раздела будут стыковаться и нормальные компоненты полей, терпящие разрывы на границах. Но как оказалось, схема оказывается достаточно устойчивой и внутренне самосогласованной, чтобы при многократных шагах эволюции автоматически учитывать скачки полей на границах. Итоговые поля обладают теми же самыми значениями потоков через замкнутые поверхности, что и начальные поля. Это означает, что никаких новых источников, которые могли бы появиться именно на резких скачках материальных параметров, в данном FDTD алгоритме не возникает. Объяснение столь замечательной устойчивости схемы, на наш взгляд, лежит в том, что хотя мы используем сеточные функции для векторов  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  и  $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ , на самом деле эти значения  $\mathbf{E}(\mathbf{r}_i)$  и  $\mathbf{H}(\mathbf{r}_i)$  есть усредненные значения полей на линейных (для вектора  $\mathbf{E}_i$ ) и поверхностных (для вектора  $\mathbf{H}_i$ ) элементах, а не в узлах сетки. Таким образом, согласование полей происходит хотя и локально, но не точно, удовлетворяя соотношениям непрерывности.

Рассмотренные алгоритмы FDTD метода успешно реализуются на современных персональных компьютерах., хотя и требуют больших объемов памяти. При разработке приложений алгоритмов FDTD, кроме непосредственно алгоритмизации схемы решения уравнений Максвелла, следует обращать особое внимание на вопросы применения эффективных поглощающих граничных условий (ПГУ), позволяющих моделировать системы с существенным рассеянием излучения за собственные пределы.

Важнейшая черта любого численного метода, работающего в реальном пространстве является наличие эффективного способа ограничения пространства для вычислений. Другими словами, это наличие граничных условий (ГУ). В качестве граничных условий в задачах закрытого типа, например, в расчетах металлического резонатора, используются идеальные электрические или магнитные проводники, а в случае невозможности разделения полей по поляризации — просто идеальные проводники. При этом, на граничной поверхности полагаются равными нулю те компоненты полей, которые обладают свойством непрерывности. В случае идеального проводника все компоненты полевых векторов приравниваются к нулю на границе.

Таким образом, в данной статье основное внимание уделяется вопросу выбора граничных условий, позволяющих с одной стороны корректно построить модель ФКВ, а с другой стороны – получить приемлемые требования к характеристикам вычислительных средств. Результаты реализации модели, с использованием выбранных в данной статье граничных условий, авторы планируют поместить в другой статье, так как они потребуют достаточно объемных пояснений, выходящих за рамки данной работы.

### ***Требования к граничным условиям моделей ФКВ***

При моделировании процессов, протекающих в фотонно-кристаллических волноводах, которые характеризуются наличием трансляционной периодичности в одном или нескольких измерениях, вычислительное пространство закономерно прерывается периодическими или блоховскими ГУ. При этом появляется возможность кардинального сокращения размеров области вычислений. Например, в случае идеальной трехмерной периодической решетки, для расчета зонной структуры можно ограничиться одной элементарной ячейкой в реальном пространстве или неприводимой частью зоны Бриллюэна. На границах вдоль каждого направления периодичности мы вправе применить условия

$$\mathbf{E}(\mathbf{r} + \mathbf{Q}_i) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot e^{i\mathbf{k}\mathbf{Q}_i}, \quad \mathbf{H}(\mathbf{r} + \mathbf{Q}_i) = \mathbf{H}(\mathbf{r}) \cdot e^{i\mathbf{k}\mathbf{Q}_i} \quad (1)$$

где  $\mathbf{k}$  – блоховский вектор решетки данного ФКВ;

$Q_i, i = 1, 2, 3$  – размеры элементарной ячейки вдоль соответствующих осей решетки.

Сложнее обстоит дело в случае расчета открытых систем, включая системы, обладающие нарушенной трансляционной периодичностью в одном или нескольких направлениях. К таким системам относятся реальные ФКВ в диэлектрических или полупроводниковых многослойных структурах. Их размеры конечны по всем направлениям, что позволяет говорить о частичной или нарушенной периодичности полагая, что периодичность возможна только в бесконечно повторяющейся системе, поэтому любая реальная система обладает тем или иным ее нарушением.

Энергия теряется в ФКВ за счет связывания дефектных волноводных мод кристалла с радиационными модами, а также за счет возбуждения вытекающих мод. Любое ограничение численного пространства ФКВ ГУ типа блоховских или идеального проводника приводит к сильным отражениям энергетических потоков назад в расчетную зону, что, в свою очередь, весьма быстро приводит к потере устойчивости и стабильности FDTD метода, численному переполнению и последующей блокировке всей расчетной процедуры.

#### **Поглощающие граничные условия**

Специально для подавления паразитного отражения вытекающей энергии назад в систему при ограничении численного пространства относительно недавно были предложены так называемые поглощающие граничные условия – ПГУ. Классическими можно считать ПГУ типа Лиао, Энkvиста или Мура, основанные на экстраполяционных схемах различного порядка с применением полиномов Ньютона. Они достаточно подробно описаны в книге [2]. Хотя они и помогают ограничить паразитное отражение, однако не являются универсальными, также их эффективность недостаточно высока. Например, ПГУ Мура обеспечивает требуемое подавление отражения только при малых углах падения. Поэтому их приходится располагать на достаточно большом расстоянии от исследуемой системы, чтобы уменьшить углы падения вытекающих волн. Поведение ПГУ Лиао в зависимости от угла падения более благоприятно. Как показано в работе [3], паразитное отражение для схемы 4-го порядка не превышает 0,01 для углов падения до  $73^\circ$ . Другие варианты ПГУ включают использование наборов аналитически выведенных функций Грина или распределенного брегговского отражателя, однако они не приобрели особой популярности в численном моделировании.

Ситуация изменилась кардинальным образом с введением в 1994 г. так называемого идеально согласующегося слоя (ИСС) или на языке оригинала PML - perfect matched layer [4]. Основная идея ИСС заключается в медленном градиентном изменении свойств некоторой искусственной среды вдоль определенного направления, например оси  $z$  для уменьшения и подавления отражения. Естественно, что эта среда при дискретизации становится плоскостойкой. Первый слой, граничащий с моделируемой структурой, ничем по своим оптическим свойствам от нее не отличается. Это означает отсутствие отражения на первой границе раздела или идеальное сочетание электромагнитных свойств двух сред. С каждым последующим слоем мнимая часть диэлектрической проницаемости, ответственная за поглощение, монотонно увеличивается, при этом вещественная часть не изменяется

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_0 \left( \varepsilon \pm i \frac{\sigma(z)}{\omega \varepsilon_0} \right), \quad \sigma(z) = \sigma_{\max} \left( \frac{z}{d} \right)^n, \quad (2)$$

где  $\varepsilon(z)$  – диэлектрическая проницаемость  $z$ -го слоя  
 $d$  – толщина всего ИСС,

$n$  – некоторое натуральное число,

$\sigma_{\max}$  - максимальная проводимость.

Знак перед мнимой частью выбирается из условия затухания волны при движении вглубь ИСС. Обычно степень  $n$  выбирается равной 2, 3 или 4.

Таким образом, отражения на границах слоев весьма малы, в то же время как поглощение излучения, проникающего вглубь ИСС возрастает. Коэффициент отражение полного ИСС в случае падения плоской волны равен [5]

$$R = \exp\{-2\sigma_{\max} k_z d / [\omega \varepsilon_0 \varepsilon (n+1)]\}. \quad (3)$$

Вообще говоря, увеличение параметра  $\sigma_{\max}$  приводит к увеличению поглощения. Однако, при определенном росте  $\sigma_{\max}$  начинают сказываться ошибки дискретизации и ошибки округления, поэтому дальнейшее наращивание  $\sigma_{\max}$  теряет смысл. Считается, что в каждом конкретном случае существует свое оптимальное значение этого параметра. Условие минимизации отражения дает следующее значение максимальной проводимости  $\sigma_{\max}$  [6]

$$\sigma_{\max} \approx \frac{n+1}{150\pi \Delta z \sqrt{\varepsilon}}, \quad (4)$$

где  $\Delta z$  – шаг дискретизации вдоль оси  $z$  (в рассматриваемом случае  $\Delta z = Q_3$ ).

Проведенные вычисления с использованием ИСС показали превосходный результат в подавлении искусственного отражения на границах вычислительной области вплоть до  $-100$  дБ. Таким образом, можно считать, что на сегодняшний день, ИСС представляет собой наиболее эффективную модель ПГУ для исследования оптических процессов в волноводах на фотонных кристаллах, отражение на границе которой слабо зависит от угла, частоты и поляризации световых волн. К недостаткам ИСС можно отнести увеличение размеров области, отводимой для ПГУ, по сравнению с моделями, использующими разностные схемы высших порядков. Исследования эффективности различных моделей ИСС проводились в [7].

В модели Беренджера поле в пределах ИСС разбивалось на две соответствующие компоненты, например, в случае ориентации слоев ортогонально оси  $z$  - на  $E_x$  и  $E_y$  и аналогично для магнитного вектора. Это разбиение носит искусственный характер и его непосредственное обобщение на случай диссипативных сред или неструктурированной пространственной решетки совсем не очевидно. К тому же поля в пределах ИСС немаксвелловы и их физическая интерпретация затруднена (В работе [8] было доказано, что уравнения Беренджера можно получить из обобщенной формы уравнений Максвелла в растянутых координатах). Эти недостатки были преодолены в анизотропной модели ИСС, предложенной для частотной области в работах [9] и для временной - в статье [10]. Каждому слою ИСС приписываются свойства некоторой анизотропной среды, обладающей поглощением. Такая среда хотя и обладает специфическими свойствами, однако, описывает среду, поля в которой удовлетворяют уравнениям Максвелла. А это означает, что мы используем максвелловы поля как в физической области сеточного пространства, так и во вспомогательной численной. По оценкам, проведенным в [11], экономия машинного времени и памяти при использовании анизотропного ИСС по сравнению со схемой Беренджера достигает 25%. Эффективность применения анизотропного ИСС подтверждается работами [12,13], где на его основе решаются различные задачи оптоэлектроники.

**Выводы.** Таким образом, при рассмотрении наиболее существенных проблем моделирования свойств фотонно-кристаллических волноводов проводимых используя FDTD следует обращать особое внимание на вопросы применения эффективных ПГУ,

позволяющих моделировать системы с существенным рассеянием излучения за собственные пределы.

### Список литературы

1. Лавриненко А.В., Лавриненко Ю.В., Черненко Д.С. Выбор численных методов для моделирования волноводов на фотонных кристаллах // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2011.-Вып.11.- С. 234-242.
2. Taflove A. and Hagness S.C. Computational electrodynamics: The finite-difference time-domain method. Artech House, Boston, 2000.
3. Wang T., Tripp A.C. FDTD simulation of EM wave propagation in 3-D media // Geophysics.-1996.-V.61, No.1.-P.110-120.
4. Berenger J. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // J. Comput.Phys.-1994.-V.114, No.2.-P.185-200.
5. Wallace J.W., Jensen M.A. Analysis of optical waveguide structures by use of a combined finite-difference/finite-difference time-domain method // J.Opt.Soc. Amer.A.-2002.-V.19, No.3.-P.610-619.
6. Hwu R.J., Wang X., Ren J. FDTD technique in gigahertz, terahertz and optoelectronic circuits // Proceed.SPIE.-1999.-V.3795.-P.662-667.
7. Vay J.-L. A new absorbing layer boundary condition for the wave equation // J.Comput.Phys.-2000.-V.165, No.1.-P.511-521.
8. Chew W.C., Weedon W.H. A 3-D perfectly matched medium from modified Maxwell's equations with stretched coordinates // Microw. Opt.Technol.Lett.-1994.-V.7, No.9.-P.599-604.
9. Wu Jo-Yu, Kingsland D.M., Lee J.-F., Lee R. A comparison of anisotropic PML to Berenger's PML and its application to the finite-element method for EM scattering // IEEE Trans.Anten.Prop.-1997.-V.45, No.1.-P.40-50.
10. Gedney S.D. An anisotropic perfectly matched layer – absorbing medium for the truncation of FDTD lattices // IEEE Trans.Ant.Prop.-1996.-V.44, No.12.-P.1630-1639.
11. Petropoulos P.G., Zhao Li, Cangellaris A.C. A reflectionless sponge layer absorbing boundary condition for the solution of Maxwell's equations with high-order staggered finite difference schemes // J.Comput.Phys.-1998.-V.139, No.3.-P.184-208.
12. Koshiha M., Tsuji Y., Sasaki S. High-performance absorbing boundary conditions for photonic crystal waveguide simulations // IEEE Microw. Wireless Compon.Lett.-2001.-V.11, No.4.-P.152-154.
13. Derudder H., Olyslager F., De Zutter D., Van den Berghe S. Efficient mode-matching analysis of discontinuities in finite planar substrates using perfectly matched layers // IEEE Trans.Anten.Propag.-2001.-V.49, No.2.-P.185-195.

**Вибір граничних умов при побудові моделей фотонно-кристалічних хвильоводів. Лавріненко А.В., Лавріненко Ю.В.**

*Стаття присвячена обґрунтуванню вибору найбільш оптимальних граничних умов, які використовуються при модульованих процесах в фотонно-кристалічних хвильоводах.*

**Ключові слова:** алгоритм, граничні умови, діелектрична проникність, відображення, періодична структура, плоска хвиля, поглинання, шар, сходимість, фотонно-кристалічний хвильовод.

**Choice of boundary conditions for developing photonic crystal waveguides models. Lavrinenko A.V., Lavrinenko Y.V.**

*The paper discusses optimal methods for formulation of absorbing boundary conditions applied in simulations of light propagation in photonic crystal waveguides*

**Keywords:** algorithm, boundary conditions, dielectric permittivity, reflection, periodic structure, plane wave, absorption, layer, convergence, photonic crystal waveguide

O.Yu. Khetselius, *d.ph.-m.n.*, A.A. Svinarenko, *c.ph.-m.n.*

*Одесский государственный экологический университет*

## ANALYSIS OF THE FRACTAL STRUCTURES IN WAVE PROCESSES

*On the basis of wavelet analysis and multifractal formalism it has been carried out an analysis of fractal structures in the wave processes (capillary-gravitational ripple).*

**Key words:** *fractals structures, wave processes*

**Introduction.** In last years it is of a great importance the experimental and theoretical studying of the non-linear dynamical systems with aim to discover the fractal features and elements of dynamical chaos (e.g. [1-18]). One of the effective approaches to solving such a problem is the multifractal and wavelet analyses. The foundations and application information on the continuous wavelet transform-based method of multifractal analysis are presented in Ref. [12]. An extension of the concept of multifractals to irregular functions through the use of wavelet transform modulus maxima and potential and limitations of the multifractal formalism in the study of non-stationary processes and short signals are in details considered in these references. Especial attention is turned to the multifractality loss effects in the dynamics of different types of systems. A review of fundamental results on the manifestation of fractal structure in wave processes is presented in [1]. Some patterns of the wave scattering and radiation by fractal structures are examined. Principal methods of random signal analysis are described to reveal different fractal structures associated with these signals and data on the wave field fractal properties are widely discussed in literature. One of the attractive examples of the fractal structures in the wave fields is the fractal ones in the wind waves on the sea surface. As it is indicated in many references (e.g. [1]) here it is possible an effect of the rays chaos. It has been defined that the fractal features are available in the shape of the disturbed sea surface as for determinative as random waves. In many papers (e.g. [1-4,13,14]) the flow exponential spectra of the wind waves with exponent  $11/3$  and  $4$  for gravitate waves are used (for capillary waves it is equal to  $17/6$ ). In fact, here the rang of scales of the fractal behavior is limited by the distortion correlation radius. It is important to note that a scattering of the waves on the sea surface can be represented as a scattering on the fractals. In paper by Elgar and Mayer-Kress (see Refs. in [1]) another approach is used in studying the fractal properties of the distortion. In fact a dimension of the attractor in the phase space is defined by the Tackens algorithm. It is shown that the surface distortion is not governed by finite dimension dynamical system with a strange attractor. In papers of Zaslavsky et al (e.g. [5]) the fractal properties of the sea surface have been considered on the scales which are more than the distortion correlation radius. In particular, on the basis of analyzing the aero-photo images it has been found the fractality in distribution of the zones for waves falling ( $d=0,5$ ). In paper by Naugolnyh-Zosimov (see Refs. in [1]) the fractal properties of the sea surface have been considered too and the laser scanning locator measurements of distribution of the mirror dots along space-temporal line, defined by the vessel running. The cited measurements were carried out in the tropical Atlantic in the opened ocean, where the tropical passates provided the stationary developed distortion during several days. In fact, multi-hours data for intensity of the capillary ripple are received. In our paper we have carried out multifractal analysis of some patterns of the wave scattering, in particular, non-linear dynamical effects in the indicated wave processes. The spatial spectrum of the large scaled changing intensity of the capillary-gravitational ripple according to the laser scanning data has been studied.



**Method.** Let us further consider wavelet analysis and multi-fractal formalism, following Refs. [11,15-18]. Since last decades, many scientists use the new powerful tool based on the wavelet decomposition for analyzing various signals. At present, the family of analyzing function dubbed wavelets is being increasingly used in problems of pattern recognition; in processing and synthesizing various signals; in analysis of images of any kind (X-ray picture of a kidney, an image of mineral, etc.); for study of turbulent fields, for contraction (compression) of large volumes of information, and in many other cases. Wavelets are fundamental building block functions, analogous to the sine and cosine functions. Fourier transform extracts details from the signal frequency, but all information about the location of a particular frequency within the signal is lost. At the expense of their locality the wavelets have advantages over Fourier transform when non-stationary signals are analyzed. Here, we use non-decimated wavelet transform that has temporal resolution at coarser scales.

The dilation and translation of the mother wavelet  $\psi(t)$  generates the wavelet as follows:  $\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2}\psi(2^j t - k)$ . The dilation parameter  $j$  controls how large the wavelet is, and the translation parameter  $k$  controls how the wavelet is shifted along the  $t$ -axis. For a suitably chosen mother wavelet  $\psi(t)$ , the set  $\{\psi_{j,k}\}_{j,k}$  provides an orthogonal basis, and the function  $f$  which is defined on the whole real line can be expanded as

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{0k} \varphi_{0,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{jk} \psi_{j,k}(t), \quad (1)$$

where the maximum scale  $J$  is determined by the number of data, the coefficients  $c_{0k}$  represent the lowest frequency smooth components, and the coefficients  $d_{jk}$  deliver information about the behavior of the function  $f$  concentrating on effects of scale around  $2^{-j}$  near time  $k \times 2^{-j}$ . This wavelet expansion of a function is closely related to the discrete wavelet transform (DWT) of a signal observed at discrete points in time. In practice, the length of the signal, say  $n$ , is finite and, for our study, the data are available monthly, i.e. the function  $f(t)$  in Eq. (1) is now a vector  $f = (f(t_1), \dots, f(t_n))$  with  $t_i = i/n$  and  $i = 1, \dots, n$ . With these notations, the DWT of a vector  $f$  is simply a matrix product  $d = Wf$ , where  $d$  is an  $n \times 1$  vector of discrete wavelet coefficients indexed by 2 integers,  $d_{jk}$ , and  $W$  is an orthogonal  $n \times n$  matrix associated with the wavelet basis. For computational reasons, it is simpler to perform the wavelet transform on time series of dyadic (power of 2) length. One particular problem with DWT is that, unlike the discrete Fourier transform, it is not translation invariant. This can lead to Gibbs-type phenomena and other artefacts in the reconstruction of a function. The non-decimated wavelet transform (NWT) of the data  $(f(t_1), \dots, f(t_n))$  at equally spaced points  $t_i = i/n$  is defined as the set of all DWT's formed from the  $n$  possible shifts of the data by amounts  $i/n$ ;  $i = 1, \dots, n$ . Thus, unlike the DWT, there are  $2^j$  coefficients on the  $j$ th resolution level, there are  $n$  equally spaced wavelet coefficients in the NWT:  $d_{jk} = n^{-1} \sum_{i=1}^n 2^{j/2} \psi[2^j(i/n - k/n)] y_i$ ,  $k = 0, \dots, n-1$ , on each resolution level  $j$ . This results in  $\log_2(n)$  coefficients at each location. As an immediate consequence, the NWT becomes translation invariant. Due to its structure, the NWT implies a finer sampling rate at all levels and thus provides a better exploratory tool for analyzing changes in the scale (frequency) behavior of the underlying signal in time. These advantages of the NWT over the DWT in time series analysis are demonstrated in Nason et al (e.g.[12]). As in the Fourier domain, it is important to assess the power of a signal at a given resolution. An evolutionary wavelet spectrum (EWS) quantifies the contribution to process variance at the scale  $j$  and time  $k$ . From the above paragraphs, it is easy to plot any time series into the wavelet domain. Another way of viewing the result of a NWT is to represent the temporal evolution of the data at a given scale. This type of representation is very useful to com-

pare the temporal variation between different time series at given scale. To obtain the results, smooth signal  $S_0$  and the detail signals  $D_j$  ( $j=1, \dots, J$ ) are

$$S_0(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{0k} \Phi_{0,k}(t) \quad \text{and} \quad D_j(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{jk} \Psi_{j,k}(t). \quad (2)$$

The fine scale features (high frequency oscillations) are captured mainly by the fine scale detail components  $D_J$  and  $D_{J-1}$ . The coarse scale components  $S_0$ ,  $D_1$ , and  $D_2$  correspond to lower frequency oscillations of the signal. Note that each band is equivalent to a band-pass filter. Further we use the Daubechies wavelet as mother wavelet [12]. This wavelet is bi-orthogonal and supports discrete wavelet transform. Using a link between wavelets and fractals, one could make calculating the multi-fractal spectrum. As usually, the homogeneous fractals are described by single fractal dimension  $D(0)$ . Non-homogeneous or multifractal objects are described by spectrum  $D(q)$  of fractal dimensions or multifractal spectrum. A problem of its calculation reduces to definition of singular spectrum  $f(\alpha)$  of measure  $\mu$ . It associates Hausdorff dimension and singular indicator  $\alpha$ , that allows calculating a degree of singularity:  $N_\alpha(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-f(\alpha)}$ . Below we use a formalism, which allows defining spectra of singularity and fractal dimension without using standard Legendre transformations. This idea at first used in ref.[8]. Wavelet transformation of some real function  $F$  can be also defined as

$$W_\Psi[F](b, a) = (1/a) \int_{-\infty}^{+\infty} F(x) \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad (3)$$

where parameter  $b$  denotes a shift in space (a space scale). The analyzing splash  $\Psi$  has to be localized as in space as on frequency characteristics. The most correct way of estimate of the function  $D(h), f(\alpha)$  is in analysis of changing a dependence of the distribution function  $Z(q, a)$  on modules of maximums of the splash-transfers under scale changes

$$Z = \sum_{i=1}^{N(a)} (\omega_i(a))^q, \quad (4)$$

where  $I=1, \dots, N(a)$ ;  $N(a)$  is a number of localized maximums of transformation  $W_\Psi[F](b, a)$  for each scale  $a$ ; function  $\omega(a)$  can be defined in terms of coefficients of the splash-transformations as

$$\omega_i(a) = \max_{\substack{(x, a') \in L \\ a' < a}} |W_\Psi[F](x, a')|, \quad (5)$$

where  $l_i \in L(a)$ ;  $L(a)$  is a set of such lines, which make coupling the splash-transformation coefficient maximums (they reach or make cross-section of a level, which is corresponding to scale  $a$ ). In the limit  $a \rightarrow 0^+$  the distribution function  $Z(q, a)$  manifests the behaviour, which is corresponding to a degree law:  $Z(q, a) \sim a^{-\tau(q)}$ . To calculate a singularity spectrum, the standard canonical approach can be used. It is based on using such functions:

$$h(a, q) = \frac{1}{Z(a, q)} \frac{\partial Z(a, q)}{\partial q}, \quad (6a)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial q} = \sum_{i=1}^{N(a)} \omega_i(a)^q \ln \omega_i(a), \quad (6b)$$

$$D(a, q) = qh(a, q) - \ln Z(a, q). \quad (6c)$$

The spectra  $D(q)$  and  $h(q)$  are defined by standard way as follows:

$$D(q) = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{D(a, q)}{\ln a}, \quad (7a)$$

$$h(q) = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{h(a, q)}{\ln a}. \quad (7b)$$

Other details can be found in Refs. [11,15-18].

**Results and conclusions.** Using the above described formalism, we have carried out a multifractal analysis of spatial spectrum of the large scaled changing intensity of the capillary-gravitational ripple. In fig.1 it is presented the initial spatial spectrum the large scaled changing intensity of the capillary-gravitational ripple according to the laser scanning data [19].

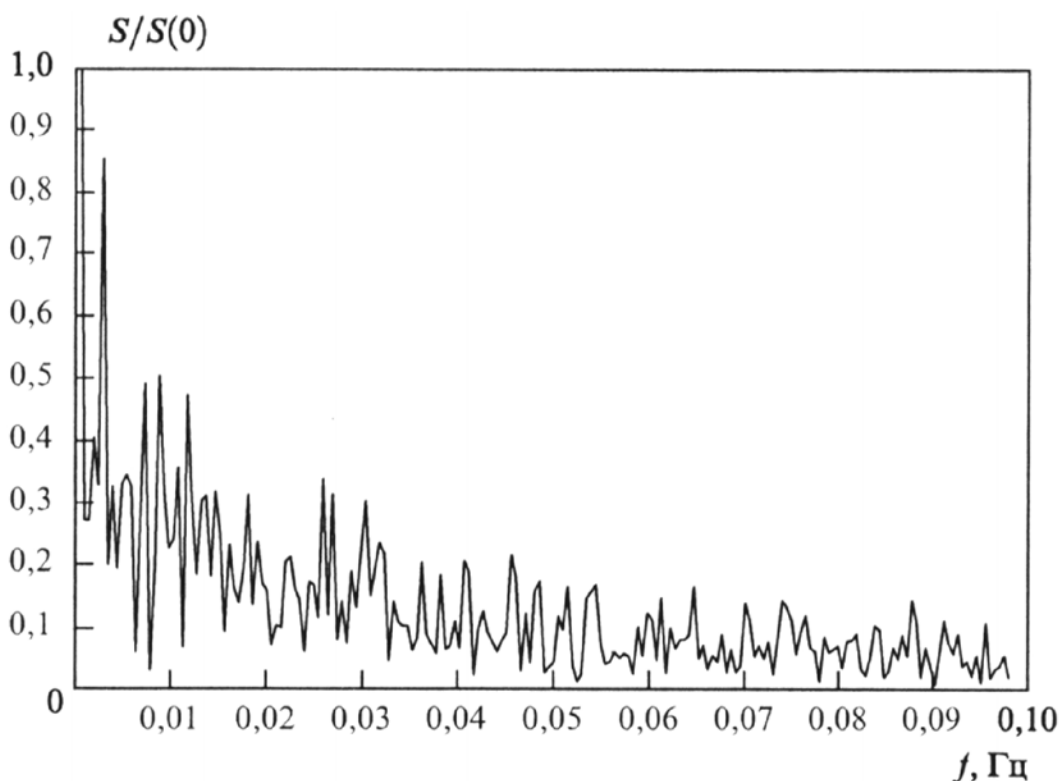


Fig. 1 - The initial spectrum of the large scaled changing intensity of the capillary-gravitational ripple according to the laser scanning data [19]. In fact a number of reflections under scanning a surface by the thin laser flux (the vessel velocity is 8m/s; frequency 1 Gz is corresponding to spatial scale 8 m).

Using the PC complex “Geomath” (c.f.[15]) we have performed the numerical calculations of the fractal spectrum for the capillary-gravitational ripple. The numerical estimates have shown that the fractals dimensions are lying in the interval [0,65-0,88]. These data are satisfactory agreed with the preliminary estimates within the correlation integral formalism [11]. Our analysis confirms the universal conclusion regarding availability of the fractal features for distortion in large scales to a weak wave turbulence for waves with non-decay spectrum. In fact speech is about a model, which describes a growth and stationary spectra of the wave distortion.

### List of References

1. Zosimov V.V., Lyamshev L.M. Fractals in wave processes//Phys. Uspekhi.-1995.-Vol.38.-P.347-380.
2. Mandelbrot B. Fractal geometry of nature.- M.: Mir, 2002.-656p.
3. Schertzer D., Lovejoy S. Fractals: Physical Origin and Properties, Ed. Peitronero L.-N.-Y.: Plenum Press.-1990.-P.71-92.
4. Sprott J.C., Vano J.A., Wildenberg J.C., Anderson M.B., Noel J.K. Coexistence and chaos in complex ecologies // Phys. Lett. A.-2005.-V.335, № 2-3.-P.207-212.
5. Zaslavsky G.M. Stochasticity of dynamical systems.- Moscow: Nauka.-1998.
6. Grassberger P., Procaccia I. Measuring the strangeness of strange attractors// Physica D.-1983.-Vol.9.-P.189-208.
7. Sivakumar B. Chaos theory in geophysics: past, present and future // Chaos, Solitons & Fractals.-2004.-Vol.19.-P.441-462.
8. Kaplan J.L., Yorke J.A. Chaotic behavior of multidimensional difference equations // Functional differential equations and approximations of fixed points. Springer Lecture Notes in Mathematics No.730 / H.-O. Peitgen, H.-O. Walter (Eds.).- Berlin: Springer, 1979.-P.204-227.
9. Packard N.H., Crutchfield J.P., Farmer J.D., Shaw R.S. Geometry from a time series// Phys. Rev. Lett.-1980.-Vol.45.-P.712-716.
10. Schreiber T. Interdisciplinary application of nonlinear time series methods // Phys. Rep.-1999.-Vol.308.-P. 1-64.
11. Svinarenko A.A. Regular and chaotic dynamics of multi-oscillator dynamical systems// Photoelectronics.-2002.-Vol.11.-P.81-84.
12. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets.- Philadelphia: SIAM, 1992.- 380p.
13. Morlet J., Arens G., Fourgeau E. and Giard D. Wave propagation and sampling theory// Geophysics.-1982.-Vol.47.-p.203-236.
14. Nason G., von Sachs R., Kroisand G. Wavelet processes and adaptive estimation of the evolutionary wavelet spectrum // J.Royal Stat.Soc. -2000.-Vol.B62.-P.271-292.
15. Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Svinarenko A.A., Bunyakova Yu.Ya., Prepelitsa G.P. Wavelet analysis and sensing the total ozone content in the earth atmosphere: Micros technology "Geomath"//Sensor Electr. and Microsys.Techn.-2005.-Vol.2, N3.-P.51-60.
16. Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Tsenenko I.A. Atmospheric teleconnection patterns: wavelet analysis// Nonlin. Proc.in Geophys.-2004.-Vol.11,N3.-P.285-293.
17. Khokhlov V.N., Glushkov A.V., Loboda N.S., Bunyakova Yu.Ya. Short-range forecast of atmospheric pollutants using non-linear prediction method// Atmospheric Environment (Elsevier).-2008.-Vol.42.-P. 7284–7292.
18. Glushkov A.V., Loboda N.S., Khokhlov V.N., Lovett L. Using non-decimated wavelet decomposition to analyse time variations of North Atlantic Oscillation, eddy kinetic energy, and Ukrainian precipitation // Journal of Hydrology (Elsevier).-2006.-Vol. 322,N1-4.-P.14-24.

#### **Аналіз фрактальних структур у хвильових процесах. Хецеліус О.Ю., Свиначенко А.А.**

Виконано аналіз фрактальних структур у хвильових процесах (капілярно - гравітаційні хвилі) на підставі вейвлет - аналізу та мультифрактального формалізму.

**Ключові слова:** фрактальні структури, хвильові процеси

#### **Анализ фрактальных структур в волновых процессах. Хецеліус О.Ю., Свиначенко А.А.**

Выполнен анализ фрактальных структур в волновых процессах (капиллярно-гравитационные волны) на основе вейвлет - анализа и мультифрактального формализма.

**Ключевые слова:** фрактальные структуры, волновые процессы

Г.П. Препелица, к.т.н., А.В. Лобода, к.ф.-м.н., О.Н. Грушевский, к.г.н.,  
В.В. Буяджи, ст. лаб.

*Одесский государственный экологический университет*

## **К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ АППАРАТА НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ В ЗАДАЧАХ ПРИКЛАДНОЙ ЭКОЛОГИИ И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ**

*На основе ранее развитых моделей нейросетевого моделирования рассмотрена задача моделирования динамики нейросети с различными видами входных паттернов и прогнозирования пространственно-временной структуры полей концентраций загрязняющих атмосферу промышленного города веществ, а также полей интенсивности осадков.*

***Ключевые слова:** нейросетевое моделирование, сложные паттерны, структура полей концентраций загрязняющих веществ*

**Введение.** Одной из актуальных проблем современной физики окружающей среды является разработка новых методов и схем для теоретического и экспериментального моделирования и измерения характеристик загрязнения воздуха, скажем, в атмосфере промышленных городов, в разнообразных классах задач современной прикладной экологии и гидрометеорологии. С развитием новых технологий развитие получили и экспериментальные методы исследований, связанные с применением радаров, лазерных систем и т.д. В теоретических разработках, помимо классических физико-химических моделей анализа в последние годы успешно применяются и относительно новые методы математического моделирования, и, прежде всего, методы теории хаоса, нейросетевого (НС) моделирования и искусственного интеллекта (см., напр., [1-12]). В этом контексте особый интерес вызывает использование аппарата НС моделирования и распознавания образов [1-5]. Важно подчеркнуть, что, хотя известный прогресс в изучении и построении различных моделей НС достигнут, тем не менее, многие ключевые вопросы, имеющие отношение к их основным динамическим параметрам, моделям функционирования до сих пор далеки от своего разрешения. Более того, конкретные применения методов НС моделирования в задачах прикладной экологии и гидрометеорологии находятся фактически на начальном этапе [5]. К числу крайне актуальных задач здесь, прежде всего, следует отнести адаптацию моделей НС моделирования к конкретным экологическим или гидрометеорологическим системам. Среди нерешенных задач крайне важной является задача моделирования динамики НС систем с подачей на вход системы так называемых зашумленных паттернов.

Настоящая работа продолжает наши исследования [5-10] по изучению и моделированию динамики многослойных НС и посвящена адаптации нашего НС РС комплекса к решению задачи моделирования пространственно-временной структуры полей концентрации загрязняющих воздушный бассейн промышленного города веществ (в частности, на примере пыли), а также аналогичной задачи моделирования полей интенсивности осадков (объектов). Отметим, что ранее [7-12] методами объектно-ориентационного программирования нами была выполнена программная реализация новых численных моделей 3-слойных НС систем на основе фотонного эха и проведены компьютерные эксперименты с целью выяснения их оптимально-информационных возможностей в задачах распознавания образов и сложных сигналов.

**Нейронная сеть и ее характеристики.** Основные аспекты теории НС систем на основе фотонного эха изложены ранее, в частности, в работах [5-9]. Поэтому ниже мы

ограничимся кратким изложением основополагающих аспектов реализации модели НС на основе фотонного эха. Принципиальная схема НС для обработки последовательности образов  $y^1, \dots, y^p$  имеет следующий вид [5-8]: {↓Вход→ Накопительная матрица F1→→Корреляционная область→Накопительная матрица F2→Выход→ Пороговое устройство→↑}. Первый импульс имеет равную единице амплитуду на всей плоскости среды, второй определяет векторы памяти, поступающие в виде вертикальных столбцов и обеспечивающие накопление в среде матриц памяти  $F_1 = F_2$  размером  $(N \cdot p)$ , а третий импульс, амплитуда которого определяется распознаваемым одномерным образом, поступает на вход системы и равномерно распределяется по среде в горизонтальном направлении. В результате возникают стимулированные эхо- сигналы, которые собираются оптически в горизонтально расположенный одномерный массив в корреляционной области. На первом этапе вычисляются внутренние произведения между входным вектором и векторами памяти. Выражение для амплитуды сигнала стимулированного фотонного эха имеет классический вид  $u(m) \sim \sum_j y_j^m y_j^{in}$ . Внутренние произведения взвешивают накопленные в матрице F2 соответствующие векторы памяти  $y^1, \dots, y^p$ . Эта операция также приводит к возникновению сигналов стимулированного эха, которые далее суммируются, приводя к 1-мерному распределению с амплитудой  $s_i \sim \sum_m u(m) y_{ii}^m = \sum_m (y_i^m) \sum_j y_j^m y_{ij}^{in}$ . Искомые соотношения, а также пороговые преобразования и обратная связь определяют динамику НС с хэббовской матрицей связи. Один из важных преимуществ реализации НС, основанной на эффекте фотонного эха, есть возможность замены разрешения образов памяти в пространстве разрешением во времени. В результате это приводит к возможности обработки 2-D массивов. Учет эффекта запаздывания производится в рамках стандартной схемы (см.[5,6]).

Разработанный нами программный комплекс НС моделирования обладает следующими ключевыми характеристиками: многослойность, возможность введения обучения, обратной связи и контролируемых шумов. Соответствующая НС является нелинейной N-слойной сетью, состоящей из входа, скрытых и выходных слоев (см. детали в [6]). Каждый слой состоит из  $n_k$  узлов и последовательных слоев  $(k-1, k)$ , соединенных с помощью массивов весов  $(w_{i,j}^k)$ . Первоначально НС обучается на достаточно большой выборке репрезентативных данных. Цель обучения - оптимизация весов на основе ошибки между ожидаемым и рассчитанным выходами. Искомый процесс базируется на использовании алгоритма обратного распространения ошибки с применением к последовательности  $(N+1)$ -элементов (к примеру, последовательности радарных изображений полей объектов). Значения величин осадков содержащиеся в всех  $n_0$  пикселях изображений полей объектов представляют собой входной вектор. В табл.1 приведены использованные в настоящей модели данные.

Вектор  $y_i^0$  преобразуется в вектор  $y_i^1$  (скрытый слой), который, в свою очередь, преобразуется в выходной вектор  $y_i^2$ . Оба преобразования выполняются с использованием матрицы весов в соответствии со следующей формулой

$$y_i^k = f \left\{ \sum_{j=1}^{n_k-1} w_{i,j}^k y_j^{k-1} + w_{i,0}^k \right\} \quad i=1, \dots, n_k; k=1, \dots, 2; \quad (1)$$

Таблица 1 – Данные о векторах, использованных в настоящей модели

Слой	Обозначение	Интервал	Размер
1 входной слой	$y_i^0$	$i=1, \dots, n_0$	$n_0=n \times 100$
2 скрытый слой	$y_i^1$	$i=1, \dots, n_1$	$n_1=300$
3 выходной слой	$y_i^2$	$i=1, \dots, n_2$	$n_2=1 \times 100$
Ожидаемый выход	$y_i^3$	$i=1, \dots, n_3$	$n_3=1 \times 100$

В формуле (1) функция  $f$  является так называемой передаточной функцией, для определения которой мы используем выражение вида  $f=1/[1+x^{b(D)}]$ , где  $b(D)$  является так называемым оптимизационным параметром ( $D$  - фрактальной размерность). Выходной вектор  $y_i^2$  содержит выходной результат, т.е. последовательность  $(N+1)$  паттернов (объектных изображений). Ключевой далее является процедура сравнения полученных выходных результатов с ожидаемыми. Для этих целей рассчитывается величина отклонения (ошибки)  $e_i^2=y_i^3-y_i^2$ ,  $i=1, \dots, n_2$ . На основании данных об ошибках, далее проводится корректировка всех весов для скрытого и выходного слоев нейросети следующим образом

$$\Delta w_{i,j}^2 = \alpha^2 e_i^2 (1 - y_i^2) y_i^2 y_j^1, \quad i=1, \dots, n_2; j=1, \dots, n_1, \quad (2)$$

где  $\alpha^2$  - параметр обучения. Далее ошибки  $e_i^2$  и скорректированные веса  $w_{i,j}^k$  распространяются в обратном направлении для оценки ошибки предыдущего слоя

$$e_i^1 = (1/n_2) \sum_{j=1}^{n_2} e_j^2 w_{j,i}^2, \quad i=1, \dots, n_1. \quad (3)$$

Наконец, по аналогии корректируются все веса между входным и скрытым слоями. Обучение проводится до тех пор, пока не будет выполнено заданное число итераций, или не достигнута заданная точность. Когда процесс обучения завершен, далее реализуется прогноз в 15-минутный интервал вперед  $(N+1)$  элементов) с использованием последовательности  $N$ -элементов с известными весами. Качество моделирования проверяется как на зависимых (входящих в обучающую выборку), так и независимых (невходящих в обучающую выборку) данных.

**Результаты моделирования и выводы.** Модель, основанная на описанной НС, адаптируется нами для прогнозирования пространственно-временной структуры полей загрязняющих атмосферу промышленного региона веществ, а также полей интенсивностей осадков. В качестве исходных данных были взяты соответствующие наборы измеренных и компиляционных данных по концентрации пыли (2000-2003 годы), в Гданьском регионе, детально описанные в [13]. Рассмотрение проводилось для площади примерно  $40 \text{ км}^2$  с пространственным разрешением  $0,2 \times 0,2$  км. Входные данные, заложенные в модель, представляли собой систему  $N$  последовательных изображений с 15 мин. шагом по времени. Прогноз делался на последующие 15 минут. В качестве иллюстрации возможностей НС на рис. 1 приведены результаты работы НС, в частности, результат компьютерного эксперимента по моделированию динамики НС с входным зашумленным импульсом (рис.1.).

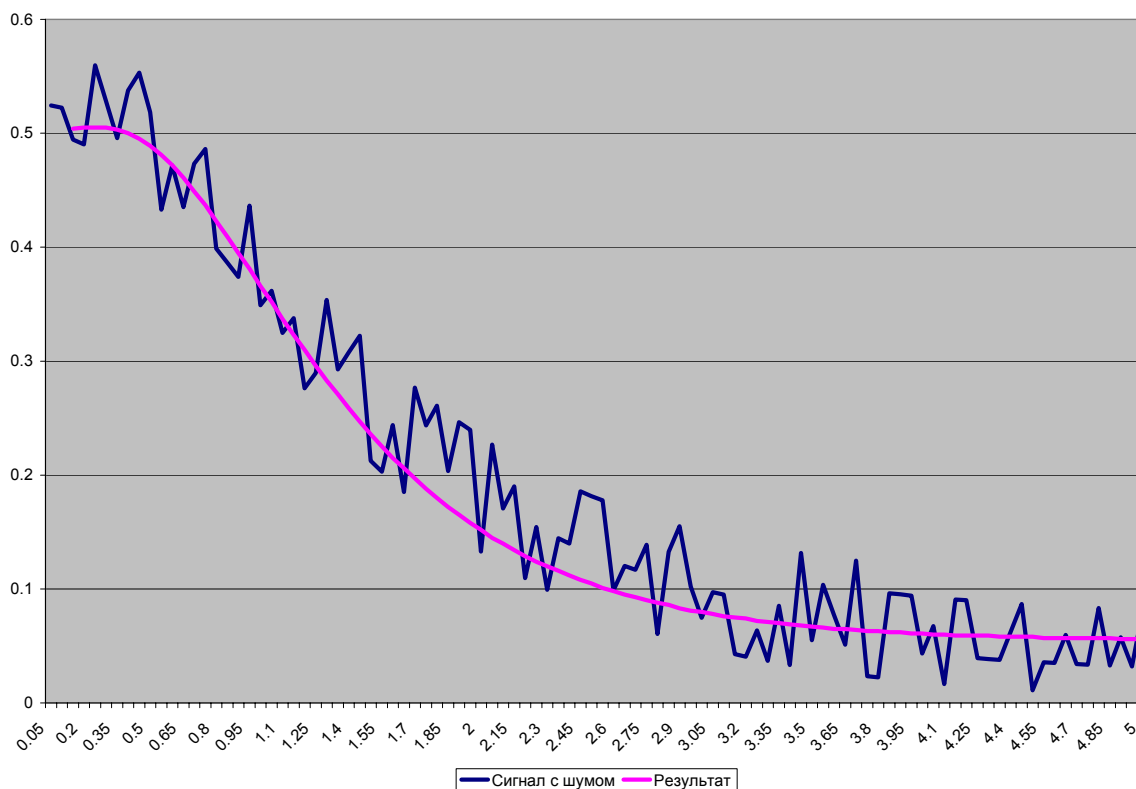


Рис.1 - Результат моделирования динамики НС для случая зашумленной входной последовательности.

Предварительное НС моделирование структуры полей загрязняющих атмосферу промышленного региона веществ, а также параллельно полей интенсивностей осадков показало, что прогнозное и ожидаемое распределение искомым паттернов соотносится с  $\sim 95\%$  вероятностью совпадения (при увеличении размера слоя до  $4 \cdot 10^3$ , и числа итераций до  $5 \cdot 10^3$ , что является вполне приемлемым результатом. Детальные результаты этого моделирования будут рассмотрены в отдельной работе.

В заключение отметим, что анализ результатов моделирования динамики НС для различных входных последовательностей образов, в том числе, и для случая зашумленной входной последовательности, а также полученных предварительных результатов прогнозирования пространственно-временной структуры полей загрязняющих атмосферу промышленного региона веществ и полей интенсивностей осадков с использованием описанной в работе НС однозначно указывает на перспективность использования НС моделирования при изучении динамики экологических и метеорологических систем.

#### Список литературы

1. *Neural Computers*, Eds. R.Eckmiller, C.Malsburg.- Berlin: Springer, 1998.-650p.
2. *Neural Networks for Computing*, Ed. J.Denker.- New York: AIP Publ., 2000.-604p.
3. Маныкин Э.А., Самарцев В.В. Оптическая эхо-спектроскопия.- М.: Наука, 1994.- 180с.
4. Маныкин Э.А., Сурина И.И. Нейронные сети и их оптические воплощения.- М.: РНЦ "Курчатовский Институт", 1993.-320с.



5. Глушков А.В., Лобода А.В., Свиначенко А.А. Теория нейронных сетей на основе фотонного эха и их программная реализация.- Одесса: ТЕС, 2003.-256с.
6. *Glushkov A.V., Loboda A.V.* Program realization of models of the optical neural networks Препр./МОНУ.НДІ фізики Одеського національного університету ім.І.І.Мечникова; Ph-L-3-01.-Одесса: Астропринт, 2001.-12р.
7. Лобода А.В., Буяджи В.В. Динамика многослойной оптической нейронной сети: численная реализация для сложных паттернов//Вестник Одесского гос. экологического университета.- 2007.-N4.-С.363-367.
8. Лобода А.В., Свиначенко А.А., Ивануцкая Л.А. Динамика многослойной нейронной сети на основе фотонного эха: численная реализация// Вестник Одесского гос. экологического университета.-2006.-№3.-С.363-367.
9. Лобода А.В., Сербов Н.Г., Свиначенко А.А., Буяджи В.В. Динамика многослойной нейронной сети на основе фотонного эха: численная реализация с входным прямоугольным импульсом//Вестник Одесского гос. экологического университета.- 2008.-N5.-С.220-224.
10. Лобода А.В., Сербов Н.Г., Свиначенко А.А., Буяджи В.В. Динамика многослойной нейронной сети на основе фотонного эха: численная реализация с входным соподобным импульсом// Вестник Одесского гос. экологического университета.- 2008.-N6.-С. 245-249.
11. Глушков А.В., Лобода А.В., Сербов М.Г., Свиначенко А.А., Буяджи В.В. Динамика многослойной нейронной сети на основе фотонного эха: численная реализация с входным синусоидальным импульсом// Sensor Electr. and Microsyst. Technologies.- 2008.-N4.-P.63-67.
12. Лобода А.В., Сербов Н.Г. , Свиначенко А.А., Ткач-Перельгина Т.В., Динамика многослойной нейронной сети на основе фотонного эха: численная реализация с входным зашумленным паттерном// Вестник Одесского гос. экологического университета.-2009.-N7.-P.246-250.
13. *Khokhlov V.N., Glushkov A.V., Loboda N.S., Bunyakova Yu.Ya.* Short-range forecast of atmospheric pollutants using non-linear prediction method// Atmospheric Environment (Elsevier; The Netherlands).-2008.-Vol.42.-P. 7284–7292.

**До питання про застосування апарату нейромережевого моделювання та визначення паттернів в задачах прикладної екології та гідрометеорології**

**Препелица Г.П., Лобода А.В., Грушевський О.М., Буяджи В.В.**

*На основі раніше розвинутих моделей нейромережевого моделювання розглянуті задачі моделювання динаміки нейромереж з різними видами вхідних паттернів та прогнозування просторово-часової структури полів концентрацій забруднюючих атмосферу промислового міста речовин, а також полів інтенсивності опадів.*

**Ключові слова:** *нейромережеве моделювання, складні паттерни, структура полів концентрацій забруднюючих речовин*

**On application of the neural network modelling and pattern recognition approach to problems of applied ecology and hydrometeorology**

**Prepelitsa G.P., Loboda A.V., Grushevsky O.N., Buyadzhi V.V.**

*On the basis of previously developed models of neural network modelling it is studying a dynamics of neural networks with different types of input patterns and a problem of forecasting the spatial and temporal structure of the fields of concentration of the industrial city's atmosphere pollutants as well as the rainfall intensity fields.*

**Keywords:** *neural network modelling, complex patterns, structure of pollutants concentration fields*

УДК 551.581.1

**В.Н. Сытов\***, к.г.н., **Д.И. Вельмискин**, к.т.н., **Ю.В. Лавриненко**, к.т.н.,

**А.С. Лимонов**, к.т.н., **Б.В. Перелыгин**, к.т.н., **Пустовит Т.М.**, асс.

*Одесский государственный экологический университет*

*\*Гидрометеорологический центр Черного и Азовского морей*

## **АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ПУТЕЙ ЕЕ РАЗВИТИЯ**

*В статье дается анализ системы получения и обработки результатов радиозондирования и обоснование путей ее развития.*

*Ключевые слова:* радиозонд, система, атмосфера, радиолокационные методы, метеопараметры, навигационные системы.

**Введение.** Известно, что существующие системы радиозондирования в Украине состоят из наземных радиотехнических комплексов (НРТК), радиозондов (РЗ) и аппаратуры подготовки РЗ к запуску. Многолетний опыт эксплуатации такой системы показал, что она имеет существенные недостатки [1, 2]:

1. НРТК является дорогостоящим изделием ("Метеорит – 2", "Радиотеодолит – УЛ" порядка сотни тысяч гривен за каждый образец).

2. Требуется достаточно больших экономических затрат на эксплуатацию (расход электроэнергии; расходные материалы, которые в настоящее время в Украине не выпускаются; содержание обслуживающего персонала и т.д.). Например суточная эксплуатация системы «Радиотеодолит – УЛ» составляет 2500 грн.

3. Используемые РЗ (типа МАРЗ, ПАЗА) позволяют измерять прямыми методами только температуру и влажность, а давление, скорость и направление ветра косвенными методами. При этом стоимость РЗ, оболочки и подготовка РЗ к запуску составляет 800 грн.

4. Проверка работоспособности РЗ перед выпуском в системе "Метеорит – 2" не автоматизирована, а в системе "Радиотеодолит – УЛ" – не удовлетворяет требованиям, о чем свидетельствуют отчеты Гидрометеорологического центра Черного и Азовского морей (ГМЦ ЧАМ) [1, 2].

5. Обработка метеорологической информации (МИ) в системе "Метеорит – 2" вообще не автоматизирована, а в системе "Радиотеодолит – УЛ" не удовлетворяет требованиям Гидрометцентра Украины.

6. Существующая система радиозондирования и способы обработки МИ, получаемой от РЗ, не позволяют привязать ее к атмосферным эшелонам, что ухудшает качество краткосрочных прогнозов.

Все указанные недостатки требуют разработки новых подходов к системе радиозондирования.

**Материалы и метод исследования:** отчеты о работе системы радиозондирования ГМЦ ЧАМ и их анализ.

**Цель статьи:** разработка системы радиозондирования атмосферы на современной элементной базе.

**Изложение основного материала.** Общая структура системы радиозондирования атмосферы представлена на рис. 1, которая состоит из спутниковой системы, РЗ с оболочкой, НРТК (количество их  $n$ ).

В настоящее время определение текущих координат осуществляются радиолокационными методами с использованием активного ответа. Они позволяют в полярной системе координат измерять наклонную дальность до РЗ, угол места  $\varepsilon$  и азимут  $\beta$  линии визирования. Для использования этих данных в целях метеопрогноза требуется их пересчет в декартовую систему координат, которая связана с наземной географической системой. В настоящее время реально существует возможность определения координат подвижного РЗ с точностью достаточной для метеопрогноза. Такими системами являются действующие и развернутые системы Глонасс и GPS [3, 4]. С точки зрения эксплуатации эти системы одинаковы. Однако, с экономической точки зрения, использование системы GPS более предпочтительнее. Поэтому нами предлагается использовать систему GPS, которая позволяет определять текущие координаты РЗ в любой точке воздушного пространства

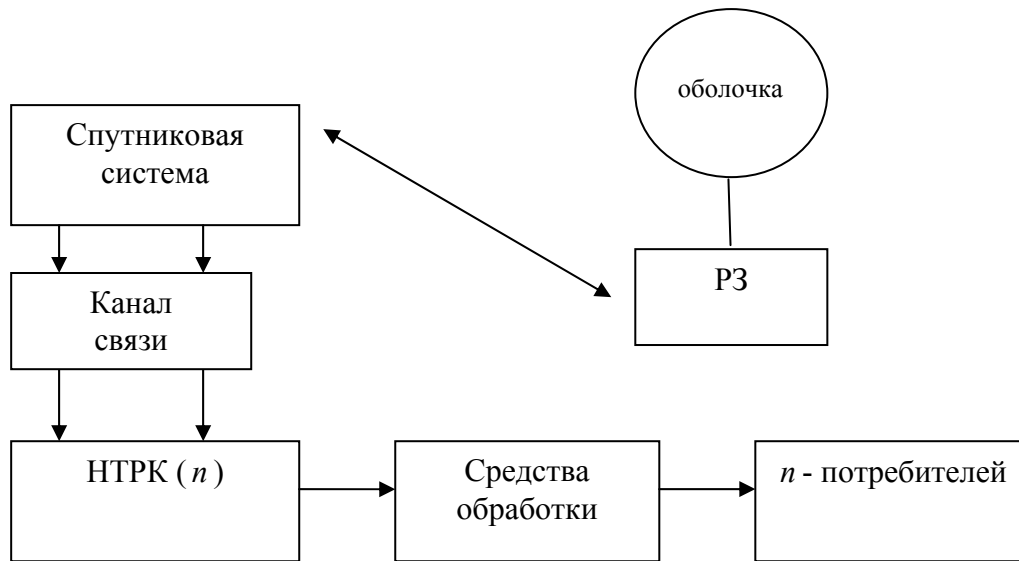


Рис. 1 – Общая структура системы радиозондирования атмосферы.

Другим не менее важным элементом предлагаемой системы радиозондирования является РЗ. Предлагаемая система получения МИ требует нового комплекса бортовой аппаратуры РЗ, которая использует цифровые принципы получения, первичной обработки и приема-передачи МИ. Структурная схема бортовой аппаратуры РЗ нового поколения приведена на рис. 2.

Принцип работы этого РЗ заключается в следующем. Метеодатчики осуществляют преобразование текущих значений метеопараметров  $x_1, x_2, \dots, x_n$  в цифровые электрические сигналы, которые поступают на вход координирующе-управляющего устройства (КУУ). На второй вход КУУ поступают сигналы с выхода приемника системы GPS. По этим сигналам определяются текущие географические координаты РЗ и запоминаются там. Каждому значению текущих значений координат РЗ будут соответствовать текущие значения метеопараметров  $x_n$ . Далее задача КУУ заключается в следующем.

КУУ формирует метеосообщение, которое содержит информацию о текущих значениях метеопараметров и текущих значениях координат РЗ. Вся эта информация в

реальном масштабе времени передающим устройством (ПУ) РЗ выдается в линию связи.

Естественно, бортовая аппаратура РЗ должна иметь автономный бортовой источник питания (БИП) достаточной мощности для гарантированного обеспечения ее работы в полете и даже, заданного времени после падения на поверхность земли, что обеспечит возможность поиска РЗ. Бортовое ПУ будет выполнять роль радиомаяка, что позволит использовать РЗ для повторного запуска.

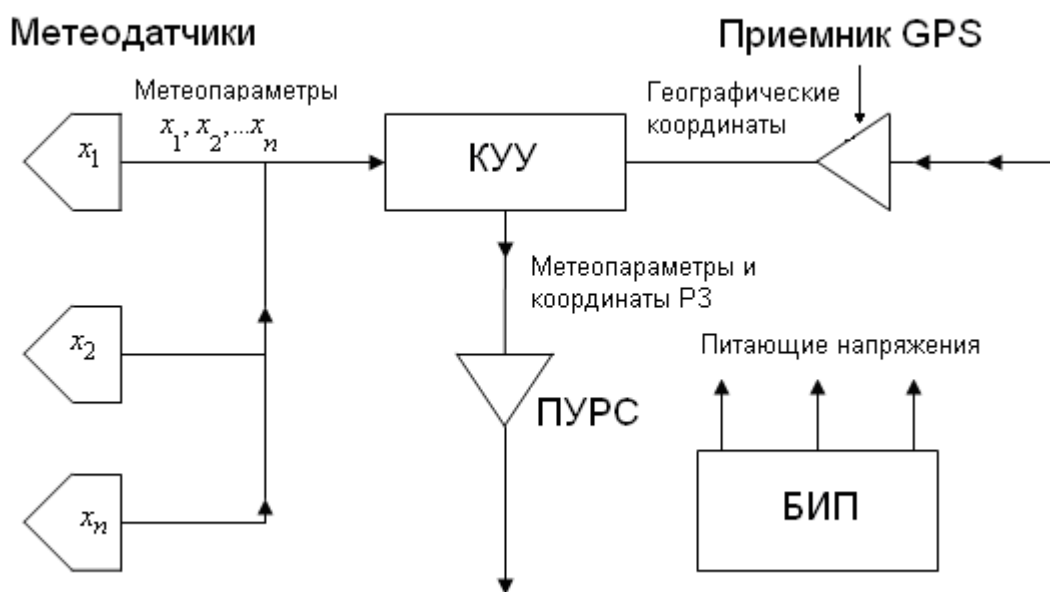


Рис. 2 – Цифровая линия связи.

Естественно предположить, что стоимость такого комплекта бортовой аппаратуры РЗ будет выше ныне применяемых. Однако, при массовом производстве и возможности повторного запуска она может быть доведена до приемлемого уровня.

Таким образом, реализация проекта перспективного РЗ потребует рассмотрения и решения следующих вопросов:

1. Выбор и обоснование перечня метеопараметров, подлежащих измерению в процессе полета РЗ с целью наиболее полного удовлетворения запросов потребителей МИ.
2. Выбор и обоснование набора цифровых датчиков метеопараметров, удовлетворяющих требованиям использования в составе бортовой аппаратуры РЗ.
3. Рассмотрение вариантов возможностей определения координат РЗ с помощью навигационных сетей и системы «Глонасс» и GPS.
4. Выбор и обоснование возможности использования цифровой линии передачи метеоданных пользователям на земле при варианте работы через спутник связи.
5. Рассмотрение технической возможности использования GSM сотовых сетей для передачи метеоданных пользователям на земле.
6. Сравнительная оценка вариантов способов передачи МИ по цифровой линии связи через спутник и по каналам GSM сотовой сети.
7. Определение величины мощности потребляемой бортовой аппаратурой РЗ электроэнергии и выбор типа бортового источника питания.

8. Рассмотрение компоновки бортовой аппаратуры РЗ и расчет ее массогабаритных характеристик с целью определения параметров несущего шара РЗ.

Другой не менее важной проблемой является выбор канала связи (линии передачи МИ от РЗ на НРТК) и протокола его функционирования.

Говоря о каналах связи, следует рассмотреть возможность передачи МИ с РЗ по широко развитой в настоящее время GSM сети. Каналы сотовой связи имеют достаточно высокую пропускную способность, позволяющую весь объем МИ с РЗ передать в реальном масштабе времени и с минимальными искажениями. Единственным ограничением может служить – отсутствие покрытия GSM сотовой сетью в морских регионах запуска РЗ. Кроме того, подлежит отдельному исследованию вопрос о возможности попадания РЗ в пределы диаграммы направленности антенн сотовых станций на высотах до 25 км над поверхностью земли. Поэтому априори единственно возможным каналом связи с РЗ остается считать спутниковый цифровой канал связи, хотя он потребует достаточных финансовых средств.

НРТК в предлагаемой концепции представляет собой приемник цифрового спутникового канала связи. Структурная схема приемника НРТК представлена на рис. 3. Приемник условно можно разделить на антенну, приемник радиоволн, микропроцессор, устройство управления, устройство памяти, источник питания. Микропроцессор руководит работой всего приемника и выполняет некоторые вычисления. Основные части устройства управления - это пульт управления с клавишами и дисплей (экран). Он дает возможность оператору руководить работой приемника, выбирать технологию наблюдений, анализировать информацию, которая выводится на дисплей, включать программы управления и вычислений. В устройстве памяти сохраняются первично обработанные сигналы, которые поступили от спутников, информация, которую ввел оператор в процессе планирования наблюдений и их выполнения, а также команды управления. Из него информация переписывается в персональный компьютер для последующих вычислений.

Источником питания служит аккумуляторная батарея приемника. Почти все приемники могут работать также от внешних источников питания.

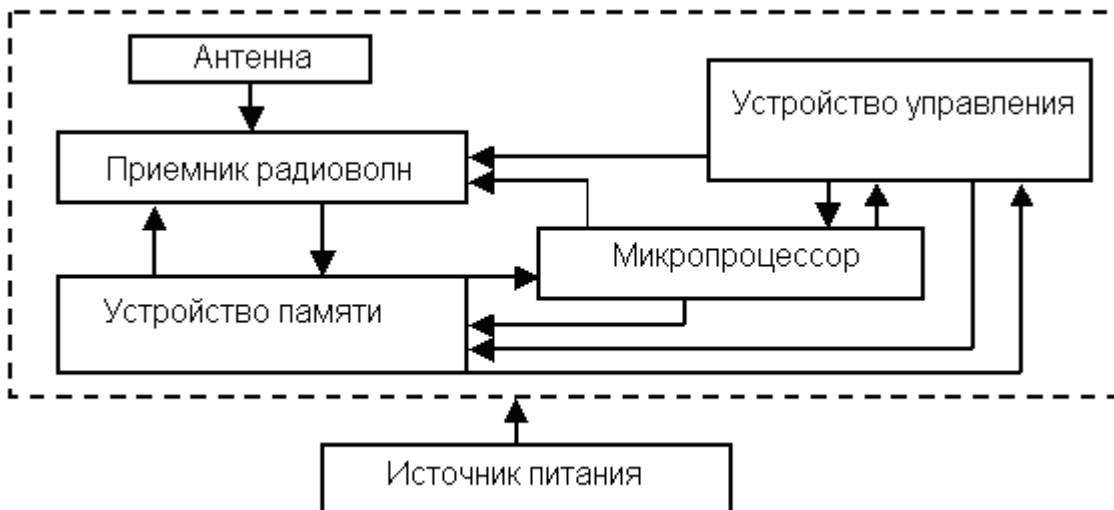


Рис. 3 – Структурная схема приемника НТРК.

Антенны приемников микрополосные и могут принимать сигналы всех спутников, которые находятся над горизонтом, если нет препятствий. Антенны одночастотных

приемников принимают колебания  $L_1$  с частотой  $f = 1575,42$  МГц и длиной волны 0,1905 м, а также колебания  $L_2$  с частотой  $f = 1227,6$  МГц и длиной волны 0,2445 м. В антенне колебания усиливаются и передаются к приемнику радиоволн.

Электрический центр антенн, пространственное положение которого определяет приемник, должен быть нечувствительным к вращению или наклонению антенны, то есть иметь четко определено положение и максимально совпадать с центром веса антенны. Антенны устанавливаются на объектах, положение которых нужно определить, или над центрами геодезических пунктов. Антенное устройство часто конструктивно отделено от остальных узлов приемника и с приемником его соединяют соответствующим кабелем.

Эта МИ, по запросам, может рассылаться заинтересованным потребителям. С другой стороны, МИ от одного РЗ могут получать сеть НТРК, расположенных в пределах до 300 км от РЗ.

**Выводы.** Нами предложены основные пути развития системы радиозондирования атмосферы, которые сводятся к следующему:

1. Разработка современного РЗ содержащего набор цифровых метеодатчиков, приемник для определения координат РЗ, передатчик цифрового канала связи, БИП.

2. Создание НРТК, имеющего приемник цифрового канала связи, сопряженного с компьютером.

**Дальнейшие** исследования будут направлены на детально-экономическое и техническое обоснование путей развития системы радиозондирования.

### Список литературы

1. Звіт про напрацювання апаратури системи «Метеорит» відділу аерологічних спостережень г. Одеса: Гідрометеорологічного центру Чорного і Азовського морів. – 2010 р. – 10 с.

2. Звіт про напрацювання апаратури системи «Радіотеодоліт УЛ» відділу аерологічних спостережень г. Одеса: Гідрометеорологічного центру Чорного і Азовського морів. – 2011 р. – 7 с.

3. Лаурица С.В. Электронные измерения и навигация. – М.: Недра, 1981. - 480 с.

4. Герман М.А. Космические методы исследования в метеорологии. - Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 351 с.

**Аналіз системи отримання і обробки результатів радіозондування і обґрунтування шляхів її розвитку.** Ситов В.М., Вельмискин Д.И., Лавриненко Ю.В., Лимонов О.С., Перельгин Б.В., Пустовит Т.М.

*В статті дається аналіз системи отримання і обробки результатів радіозондування і обґрунтування шляхів її розвитку.*

**Ключові слова:** радіозонд, система, атмосфера, радіолокаційні методи, метеопараметри, навігаційні системи.

**Analysis of the radiozonding collection and processing system and justification of its development directions.** Sitov B.M., Velmiskin D.I., Lavrinenko U.V., Limonov A.S., Pereligin B.V., Pustovit T.M.

*In this article are presented radiozonding collection processing system analyze and its direction of development justification.*

**Key words:** radiozonde, system, atmosphere, radar methods, meteoparameters, navigation sets.

## ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ ТОПОГРАФІЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО РЕЛЬЄФУ МІСЦЕВОСТІ

*В статті оцінюється можливість використання різних топографічних даних для створення цифрового рельєфу місцевості.*

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі, роздільна здатність, топографічні елементи місцевості, цифровий рельєф місцевості.

**Вступ.** У відомій літературі [1-5] недостатньо проаналізовані можливості використання різних топографічних даних для створення цифрового рельєфу місцевості.

**Матеріали і методи дослідження:** в статті оцінюється можливість використання різних топографічних даних для створення цифрового рельєфу місцевості.

**Виклад основного матеріалу.** *Вибір топографічних даних для створення цифрового рельєфу місцевості. Оцінка можливості використання даних дистанційного зондування Землі для створення цифрового рельєфу місцевості.* На сьогоднішній день дані супутникового моніторингу стають найважливішою складовою інформаційного забезпечення суспільства, необхідного для безпечного існування і стійкого економічного розвитку будь-якої держави. У коло активних споживачів космічної інформації в сучасній державній інфраструктурі входять метеослужби, міністерства, пов'язані з управлінням природними ресурсами, транспортом, будівництвом, картографією, енергетикою, а також силові відомства і природоохоронні організації. Для отримання необхідних даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) країни експлуатують власні космічні системи і купують космічну інформацію закордонних комерційних систем ДЗЗ.

Зараз на навколоремних орбітах знаходиться декілька десятків природоресурсних космічних апаратів (КА). Цінова політика надання матеріалів ДЗЗ залежить від того, яка організація надає матеріали, з якого джерела (супутника і спектрального каналу) замовляються матеріали. Для вирішення багатьох тематичних завдань необхідно скласти комплекти даних з різних приладів і з різних КА. Інформаційний продукт з різних КА відрізняється цілим рядом характеристик, серед них – якість (інтегрована характеристика) і вартість. У зв'язку з цим виникає необхідність оптимального планування збору супутникових даних за критеріями, які враховують параметри якості і фінансові характеристики.

Не дивлячись на те, що космонавтика активно встає на "комерційні рейки", висока вартість розробки і виготовлення супутників і не менш висока вартість їх запуску в космос, спільно дають дуже значну суму (від 100 млн. дол. США), що безпосередньо впливає на вироблення цінової політики відносно космічних знімків. Також в ціну входять витрати на створення і експлуатацію численних станцій прийому даних дистанційного зондування, витрати на зарплату фахівцям, які підтримують роботу супутника, інженерам і фахівцям інших напрямів, які забезпечують безперебійний потік даних від супутника безпосередньо до замовника.

Таким чином, незважаючи на запуски нових супутників і зростання конкуренції, в найближчі 10-15 років падіння цін на інформацію про дистанційне зондування Землі не передбачається. При цьому в зниженні цін зацікавлені абсолютно всі – компаніям-операторам супутників і компаніям, що поширюють космічні знімки, це необхідно для

залучення нових замовників, а замовникам - для зниження собівартості виконуваних ними робіт, але факти в наявності. Конкуренція в космічній галузі через фінансову грандіозність проектів розвивається надзвичайно повільно і саме це є основною причиною довготривалої стабілізації цін з незначним коефіцієнтом зниження.

Як приклад проаналізуємо ціни на надання послуг з ДЗЗ вітчизняного ТОВ "ТВІС" (03680 м. Київ, пр. Паладіна, 44) [6].

На підставі дистриб'юторських і партнерських угод зі світовими операторами космічних програм ТОВ "ТВІС" поширює дані високої і надвисокої роздільної здатності з супутників Geoeye - 1, IKONOS, QuickBird - 2, WorldView - 1, Rapideye, RadarSat, EROS - B, ALOS, TerraSAR - X, IRS, Cartosat, ResourceSat.

Космічний апарат США (табл. 1) GeoEye –1 запущений 6 вересня 2008 року, має найвищу роздільну здатність серед усіх комерційних супутників. Супутник виведено на полярну сонячно-синхронну орбіту заввишки 681 км, що забезпечує його проходження над будь-яким районом Землі кожні 2 дні (залежно від широти). Супутник призначений для отримання цифрових зображень земної поверхні з просторовою роздільною здатністю 41 см в панхроматичному режимі і 1,65 м в мультиспектральному режимі при зйомці в надир. Згідно із законодавством США, ці зйомки для комерційних організацій штучно закругляються до 50 см і 2 метрів відповідно.

Супутник GeoEye – 1 має високу маневреність, що дозволяє отримувати великий обсяг даних за один проліт. Розрахунковий термін перебування на орбіті становить 7 років [2].

Таблиця 1 – Вартість отримання даних з супутника GeoEye-1

Послуга	Ціна за км <sup>2</sup>	Мінімальне замовлення
Нова зйомка	35 у.о.	100 км <sup>2</sup>
Нова стереозйомка	66 у.о.	100 км <sup>2</sup>
Архівна зйомка	18 у.о.	49 км <sup>2</sup>

Супутники США ДЗЗ високої роздільної здатності WorldView–1 і WorldView –2 (табл. 2) були запущені відповідно в 2007 і 2009 роках. На даний час ці супутники дозволяють отримувати дані з роздільною здатністю 50 см/піксель і є основними постачальниками точних знімків. WorldView–2–комерційний апарат з восьмиканальним спектрометром високої роздільної здатності, який включає традиційні спектральні канали в діапазонах: червоний, зелений, синій і ближній інфрачервоний–1 (NIR –1), а також чотири додаткові спектральні канали в діапазонах: фіолетовий (чи прибережний - coastal), жовтий, "крайній червоний" (red edge), ближній інфрачервоний – 2 (NIR - 2). Спектральні канали супутника WorldView – 2 можуть забезпечити вищу точність при аналізі стану рослинності, виділенні об'єктів, аналізі берегової лінії і прибережної акваторії. Дані WorldView - 2 мають точність 6 м [8].

Таблиця 2 – Вартість отримання даних з супутника WorldView

Послуга	Мінімальне замовлення	Ціна за км <sup>2</sup>
Нова зйомка (PAN, MSI или PSM)	90 км <sup>2</sup>	30 у.о.
Нова зйомка (комплект PAN+MSI)	90 км <sup>2</sup>	35 у.о.
Архів(PAN, MSI или PSM)	25 км <sup>2</sup>	22 у.о.
Архів(комплект PAN+MSI)	25 км <sup>2</sup>	26 у.о.



Ізраїльський супутник EROS - В (табл. 3) був запущений 25 квітня 2006 року російською ракетою "Старт-1" з полігону «Свободний» в Амурській області. У класі цивільних супутників детальної зйомки Землі EROS - В є єдиним космічним апаратом класу міні: при масі 290 кг він передає на Землю зображення з просторовою роздільною здатністю 0,7 м. Супутник відноситься до апаратів подвійного використання і використовується для інформаційного забезпечення силових відомств державних цивільних структур і комерційних компаній [9].

Таблиця 3 – Вартість отримання даних з супутника EROS-B

Послуга	Мінімальне замовлення	Ціна за сцену	Ціна за км <sup>2</sup>
Нова зйомка PAN	1 сцена (49 км <sup>2</sup> )	1265 у.о.	-
Нова стереозйомка	2 сцени (49 км <sup>2</sup> )	2490 у.о.	-
Архівна зйомка PAN	25 км <sup>2</sup>	637 у.о.	13 у.о.

Японський супутник ALOS (табл. 4) був запущений 24 січня 2006 року з японського космодрому Танегашіма і виведений на сонячно-синхронну орбіту заввишки 691,65 км. Власником супутника є японське аерокосмічне агентство JAXA. Супутник ALOS оснащений: картографічною стереокамерою PRISM, що дозволяє отримувати знімки з роздільною здатністю до 2,5 м; мультиспектральною камерою (AVNIR – 2) для отримання кольорових знімків з роздільною здатністю 10 м; радаром PALSAR L – діапазону, призначеним для цілодобового і всепогодного спостереження Землі, що дозволяє отримувати зображення з роздільною здатністю від 10 до 100 метрів. Сенсор PRISM складається з трьох об'єктивів для зйомки вперед, вниз і назад. PRISM забезпечує не лише високу роздільну здатність, але також і ширину смуги покриття до 70 км [10].

Таблиця 4 – Вартість отримання даних з супутника ALOS

Отримувані дані	Ціна за сцену
Панхром 2,5 м (кадр 35км x35км)	1100 у.о.
Мультиспектр 10 м (кадр 70км x70км) 4 канала	1100 у.о.

Індійська космічна програма IRS (Indian Remote Sensing satellites) успішно функціонує з 1988 року з моменту запуску першого супутника цієї серії IRS – 1A. Космічний апарат IRS – 1С був запущений 28 грудня 1995 року російською ракетою "Молнія" з космодрому Байконур (Казахстан). IRS - 1D був запущений 29 вересня 1996 року за допомогою ракети PSLV - С1 з космічного центру ім. Сатиша Дхвана (о. Шрихарикота). Супутники IRS - 1С, IRS–1D (табл. 5) були виведені на полярну сонячно-синхронну орбіту заввишки 817 км і 373-823 км відповідно. Супутники призначені для отримання цифрових зображень земної поверхні з просторовою роздільною здатністю 5,8 м в панхроматичному режимі, з роздільною здатністю 23,5 і 70 м в мультиспектральному режимі (LISS - 3), а також з роздільною здатністю 188 м (WiFS) [11].

Для порівняння проаналізовані ціни на надання послуг з ДЗЗ російської фірми СОВЗОНД (табл.6) [12].

Аналіз показує, що в різних організаціях і комерційних фірмах на однотипну космічну інформацію ціни різняться несуттєво. Тому нескладно розрахувати межі

вартості знімків, необхідних для придбання і складання цифрової карти рельєфу усієї території України. При цьому треба врахувати те, що для складання цифрової карти рельєфу потрібні або дані альтиметричної зйомки з супутника, подібного RadarSat, або стереографічні знімки місцевості з високою роздільною здатністю.

Таблиця 5 – Вартість отримання даних з супутника IRS

Отримані дані	Розмір кадру	Ціна	Частина кадру
PAN, 5.80 м/піксель, чорно-біле зображення (панхром)	(23 x 23) км	435 у.о.	1/9
PAN, 5.80 м/піксель	(23 x 46) км	690 у.о.	2/9
PAN, 5.80 м/піксель	(23 x 70) км	975 у.о.	1/3
PAN, 5.80 м/піксель	(46 x 46) км	1260 у.о.	4/9
PAN, 5.80 м/піксель	(46 x 70) км	1830 у.о.	2/3
PAN, 5.80 м/піксель	(70 x 70) км	2205 у.о.	кадр
LISS-3, мультиспектральні дані, 23.50 м/піксель	(70 x 70) км	290 у.о.	1/4
LISS-3, 23.50 м/піксель	(70 x 140) км	540 у.о.	1/2
LISS-3, 23.50 м/піксель	(140 x 140) км	900 у.о.	кадр

Для території України, площа якої складає 603,7 тисячі квадратних кілометрів, вартість виражатиметься в межах від 8 млн. у.о. до 40 млн. у.о.

Ніякий вищий навчальний заклад країни, та і велика частина державних установ не в змозі придбати космічні знімки для цілей складання цифрових карт рельєфу місцевості за подібні гроші.

Тому на цьому етапі розвитку економіки застосовувати метод створення цифрового рельєфу місцевості на основі даних дистанційного зондування Землі не має змоги.

Таблиця 6 – Вартість отримання даних фірми СОВЗОНД

Супутник/сенсор	Держава / агентство	Ціна знімка, у.о	Ширина полоси зйомки / кадра	Роздільна здатність, м
Meteosat / MVIRI	ЕКА	113	півкуля	2500
NOAA / AVHRR	США	115	2400км	1000
Ресурс-О / МСУ-СК	Росія	1300	600 км	150
IRS	Індія	300	130 км	36
MOS	Японія	316	100 км	50
Landsat / MSS	США	1233	(185x170) км	80
Ресурс-О / МСУ-Э	Росія	200	45 км	35
Landsat / TM	США	5180	(185x170) км	30
Spot / XS	Франція	2487	60 км	20
Spot / P	Франція	3133	60 км	10

**Оцінка можливості топографічних карт для створення цифрового рельєфу місцевості. Типи даних топографічних карт для створення цифрового рельєфу місцевості.** Топографічні елементи місцевості зображуються на топографічних картах у вигляді умовних знаків, знаючи які, можна уявити характер і взаємне розташування місцевих предметів. Абсолютно всі об'єкти місцевості позначити неможливо, навіть на

карті найбільшого масштабу. З метою підвищення наочності та читання топографічної карти дрібні та незначні об'єкти на ній не позначаються.

Умовними знаками топографічних карт називається система графічних, літерних, цифрових та кольорових позначень, яка дозволяє зобразити місцевість на карті. До умовних знаків завжди ставилися серйозні вимоги, основними з яких є:

- знаків не повинно бути багато, оскільки їх усі треба знати;
- знаки мають нагадувати об'єкт, який зображується;
- знаки мають бути досить простими для накреслення та запам'ятовування.

Тому умовні знаки періодично змінюються. На даний час використовуються умовні знаки, прийняті у 1983 році. Умовні знаки стандартні і обов'язкові для всіх відомств та установ, що займаються створенням топографічних карт. На всіх топографічних картах умовні знаки одних і тих самих об'єктів загалом однакові й відрізняються тільки розмірами. Цим і забезпечується стандартність умовних знаків і полегшується читання карт різних масштабів.

Графічні умовні знаки поділяються на масштабні, позамасштабні, лінійні та пояснювальні.

Масштабні (контурні) умовні знаки застосовуються для зображення місцевих предметів, розміри яких виражені у масштабі карти і можна визначити площу такого об'єкта (ліс, лука, чагарник, болото тощо). Зовнішні межі (контури) таких об'єктів позначаються на карті точковим пунктиром, якщо вони не збігаються з лініями місцевості (дорогами, річками тощо).

До пояснювальних знаків належать ті, що вказують на вид рослинності, напрямок течії річок, глибину болота тощо.

Позамасштабні умовні знаки застосовуються для зображення об'єктів, розміри яких не можна показати у масштабі карти (башти, колодязі, пам'ятники, окремі дерева тощо), а отже, не можна визначити за картою шляхом вимірювань. Точне розташування цих предметів визначається головними точками, якими і користуються при визначенні координат, вимірюванні відстаней та вирішенні інших завдань. Лінійними знаками позначаються об'єкти місцевості, у яких за картою можна вимірювати довжину, але не можна вимірювати ширину (дороги, канали, нафтопроводи, лінії електропередач тощо). Крім графічних умовних знаків, якими позначаються місцеві предмети, для додаткової характеристики застосовуються повні й скорочені підписи та цифрові позначення.

Для підвищення наочності топографічні карти друкуються у кольорах, що відповідають забарвленню об'єктів місцевості: ліс – зеленим, гідрографія – синім, рельєф і піски – коричневим, щільно забудовані квартали населених пунктів та автошляхи з покриттям – жовтогарячим кольором.

Топографічні дані – це дані, нанесені (рис.1) на топографічні карти. Топографічна карта – детальна великомасштабна загальногеографічна карта, яка відображає розміщення та властивості основних природних та соціально-економічних об'єктів і дає можливість визначити їхнє планове та висотне положення.

Топографічні карти створюються (складаються) головним чином на основі: обробки аерофотознімків території; шляхом безпосередніх вимірювань і зйомок об'єктів місцевості; картографічними методами за вже наявними картами більших масштабів. Основними методами топографічного знімання є польовий та камеральний (лабораторний).

Як і будь-яка інша географічна карта, топографічна карта є зменшеним, узагальненим і образно-знаковим зображенням місцевості. Вона створюється за певними математичними законами, які зводять до мінімуму спотворення, що неминуче виникають при перенесенні поверхні земного еліпсоїда на площину, і, разом із тим, забезпечують максимальну її точність, на відміну від інших картографічних виробів.



Рис. 1 – Вирізка частини топографічної карти.

До топографічних даних відносять:

1. Рельєф у вигляді ізовисотних ліній.

Кожен умовний знак несе певну інформацію про місцевий предмет. Дуже важливо вміти якомога повніше розкрити зміст умовного знаку. За формою і накресленням умовного знаку спочатку визначають, який місцевий предмет зображено, а потім докладно, за додатковими елементами малюнка основного умовного знаку, пояснювальними знаками, підписами й цифрами визначають характер зображеного на карті місцевого предмета.

2. Населені пункти.

Населені пункти залежно від характеру виробничої діяльності населення та кількості мешканців у них, поділяють на міста, селища міського типу, селища сільського й дачного типів. Населені пункти, промислові та сільськогосподарські підприємства зображуються на великомасштабних картах з дотриманням їх зовнішньої межі і характеру планування, з показом вулиць, перехресть, площ, парків, садів тощо. Населені пункти при зображенні на картах поділяють за типом поселення, чисельністю мешканців і політико-адміністративним значенням.

Найважливіше значення мають міста: великі – понад 100 тисяч мешканців, середні – від 50 до 100 тисяч мешканців і малі – менше 50 тисяч мешканців.

Типи (категорії) населених пунктів і чисельність мешканців у них позначають на картах накресленням шрифтів офіційних назв цих пунктів. Міста підписуються прямим шрифтом великими літерами, селища міського типу – нахиленим (праворуч) шрифтом великими літерами, селища сільського типу – прямим шрифтом малими літерами.

Під назвою населеного пункту сільського типу вказується кількість мешканців у тисячах. Чим більшими літерами написана назва населеного пункту, тим більший він за своїм адміністративним значенням або за кількістю мешканців. Неофіційні назви населених пунктів, прийняті серед місцевих мешканців, указуються у дужках під офіційною назвою. Якщо назву населеного пункту підкреслено тонкою лінією – це означає, що поблизу є залізнична станція або пристань з такою ж назвою.

Магістральні й головні проїзди через населені пункти виділяються більш

широким умовним знаком. Як правило, таким умовним знаком позначають ті вулиці, які з'єднують за найкоротшою відстанню дороги вищих класів, що підходять до населеного пункту. Залежно від розмірів зайнятої площі, промислові, сільськогосподарські та соціально-культурні об'єкти на території населених пунктів позначаються масштабними або позамасштабними умовними знаками з відповідними скороченими пояснювальними підписами.

Окремі місцеві предмети, що мають значення орієнтирів, наносяться на карту найбільш точно. До їх числа належать: видатні пам'ятники й монументи, телевежі й радіощогли, шахти й штольні, церкви, кургани тощо.

### 3. Дорожня мережа.

Дорожня мережа позначається на топографічних картах дуже детально. Необхідно не лише знати, але й чітко уявляти характер і властивості кожної дороги.

Залізниці позначають на картах усі без винятку і класифікують:

- за шириною колії (нормальної колії, вузькоколії або трамвайні шляхи);
- за видом тяги (електрифіковані та не електрифіковані);
- за кількістю колій (одноколіїні, двоколіїні, триколіїні);
- за станом (діючі; ті, що будуються; розібрані).

На залізницях позначаються станції, роз'їзди, платформи, депо, колійні пости й будки, насипи, виїмки, мости, тунелі тощо. Автомобільні та ґрунтові дороги при зображенні на картах поділяють на дороги з покриттям і без покриття. До доріг із покриттям належать: автомагістралі (автостради), автомобільні дороги з удосконаленим покриттям (удосконалені шосе) та автомобільні дороги з покриттям (шосе).

На топографічних картах позначаються усі наявні на місцевості дороги з покриттям. Вони накреслюються у дві лінії і зафарбовуються жовтогарячим кольором. Цифрами та скороченими написами вказуються ширина дороги, ширина і матеріал покриття, які підписують безпосередньо на умовних знаках дороги. Наприклад, на шосе підпис 8(12)А означає: 8 – ширина проїжджої частини у метрах, 12 – ширина земляного полотна у метрах, А – матеріал покриття (асфальт).

Автомобільні дороги з покриттям допускають рух транспорту протягом року. Лінії зв'язку вздовж доріг позначають на картах лише тоді, коли вони відходять від дороги.

На топографічних картах також позначають: автомобільні дороги без покриття (покращені ґрунтові дороги), ґрунтові дороги (путівці), польові й лісові дороги та стежки. Автодороги без покриття – профільовані дороги, які не мають основи і покриття. Проїжджа частина систематично ремонтується та укріплюється щебенем, гравієм, піском. Більшу частину року ці дороги придатні для руху автотранспорту середньої вантажопідйомності. Зображуються на картах двома лініями без зафарбовування, з підписом, як правило, ширини земляного полотна.

Ґрунтові дороги – непрофільні, без покриття, їхня прохідність залежить від якості ґрунту, пори року і погоди. На картах зображуються однією чорною лінією.

Польові й лісові дороги – тимчасові ґрунтові дороги, рух якими здійснюється епізодично, головним чином, у період польових робіт або лісорозробок. На карті зображуються чорними переривчастими лініями.

У важкодоступних гірських та пустельних районах на картах позначаються і стежки, придатні для пішого руху. Вони також зображуються чорними переривчастими лініями, але дрібнішими, ніж у польових доріг. Ділянки польових доріг, що проходять через болотисті місця, обладнуються фашинами (пучки хмизу, перев'язані лозиною або дротом), гатями (поперечні настили з колод) і греблями (невисокі насипи на заболочених ділянках).

На автомобільних дорогах позначаються мости, тунелі, труби, насипи, виїмки.

Для мостів менше і понад 3 м застосовуються різні умовні знаки. У знаках найважливіших мостів даються технічні характеристики.

#### 4. Гідрографія.

На топографічних картах позначають прибережну частину морів, озера, річки, ставки, струмки, колодязі та інші водойми. Біля них підписуються їхні назви. Елементи гідрографії позначають на картах синім кольором. Для постійної та визначеної берегової лінії застосовується суцільний знак, для непостійної ( водойми, що пересихають) і невизначеної ( водойми, що мігрують) – штриховий знак, для підземної та берегової лінії, що зникає – пунктирний знак.

Річки, струмки, канали та магістральні канали позначаються на картах усі без винятку, причому у дві лінії позначаються на картах 1:25000 і 1:50000 при їхній ширині 5 метрів і більше, на картах 1:100000 – 10 метрів і більше.

Ширину та глибину річок (каналів) у метрах підписують у вигляді дробу, у числівнику – ширина, у знаменнику – глибина й характер ґрунту дна. Такі характеристики подаються в кількох місцях уздовж лінії річки (каналу). Назви судноплавних водоймищ підписуються великими літерами, несудноплавних – малими. Напрямок течії річок вказується стрілкою із зазначенням швидкості течії (м/с).

На річках і каналах позначаються мости, шлюзи, греблі, паромі, броди й даються їхні характеристики. Урізи води (цифри біля синього кружечка на березі водойми) означають висоту рівня води у межах над рівнем моря (в метрах).

Умовні знаки колодязів та інших джерел супроводжуються пояснювальними підписами та, у необхідних випадках, цифровими характеристиками про місткість і глибину вододжерела, якість води.

#### 5. Ґрунтово-рослинний покрив.

Ґрунтово-рослинний покрив зображується найчастіше масштабними умовними знаками у комбінації з пояснювальними написами та кольорами. Площі, зайняті деревинною рослинністю, замальовуються зеленою фарбою, зайняті чагарником і низькорослою деревинною рослинністю – світло-зеленою фарбою, трав'яна рослинність має білий фон.

Породу дерева позначають значком листяного, хвойного дерева або їхнім поєднанням, коли ліс змішаний. При наявності даних про висоту, товщину дерев та густоту лісу вказується його характеристика.

У лісових масивах позначаються просіки та нумерація кварталів.

Для окремих елементів рослинності застосовуються лінійні (вузькі смуги лісу, живі огорожі) та позамасштабні умовні знаки (окремі дерева, кущі, невеликі гаї тощо).

Ґрунти на картах позначаються лише ті, які різко відрізняються характером своєї поверхні від навколишнього середовища (солончаки, піски, такири, кам'яністі поверхні тощо). Кожен із цих різновидів ґрунту легко розпізнається на карті за коричневим забарвленням умовного знаку, за винятком боліт і солончаків, які виділяються горизонтальною та вертикальною штриховкою синього кольору. Схема ґрунтів усього району та текстова довідка про них даються на зворотному боці карти масштабу 1:200000.

Болота позначаються на карті штриховкою синього кольору з поділом їх на прохідні (перервана штриховка), важкопрохідні та непрохідні (суцільна штриховка). Прохідними прийнято вважати болота глибиною не більше 0,6 м, їх глибину на картах, як правило, не підписують.

Глибину важкопрохідних і непрохідних боліт підписують поруч з вертикальною стрілкою, яка вказує на місце проміру.

## 6. Місцеві предмети.

Місцеві предмети наносяться на топографічну карту з високою точністю: до 0,2 мм – місцеві предмети, що виділяються висотою (геодезичні пункти, труби, башти тощо); до 0,5 мм – інші точки місцевих предметів і контурів (доріг, річок тощо); до 1 мм – не різко виражені контури (межі боліт, чагарників тощо).

**Топографічні дані про рельєф, що використовуються для створення цифрового рельєфу місцевості.** Рельєф – сукупність просторових форм (нерівностей) земної поверхні. Він є одним із головних елементів географічного середовища. Характер рельєфу враховується при освоєнні та заселенні території, розвитку транспорту, промисловості, сільського господарства і будівництва, виборі місця для населених пунктів. Задача відображення рельєфу на сучасних картах загалом зводиться до двох моментів: рельєф на картах повинен бути пластичним, об'ємним, наочним; рельєф повинен бути вимірним; за картами важливо визначати абсолютні та відносні висоти, крутизну, довжину та експозицію схилів тощо.

Гора – значне за висотою куполоподібне або конічне підвищення, яке має підшову і вершину. Вершина буває найчастіше куполоподібної форми, але іноді являє собою майже горизонтальний майданчик – плато, або закінчується гострим піком. Зниження від вершини до підшови називають схилом. Схил може бути рівним, опуклим, увігнутим і хвилястим. Різкий перехід від стрімкого схилу до пологого називається виступом або терасою, а лінія, яка відокремлює терасу від стрімкого схилу, що лежить нижче, – брівкою. Гору висотою до 200 м називають горбом. Штучний горб – курганом.

Хребет – витягнуте підвищення, яке знижується в одному напрямку. Вододіл, або топографічний гребінь, – лінія, яка поєднує найвищі точки хребта. Хребет як типову форму потрібно відрізнити від гірського хребта – ланцюга гір, які спрямовані в один бік. До великих хребтів прилягають хребти менших розмірів, які називають відрогами.

Улоговина – замкнуте чашоподібне заглиблення (западина). Має край і дно (найнижчу точку). Іноді дно улоговини буває заболочене або зайняте озером. Невелику улоговину з незначною глибиною називають западиною. Улоговину дуже малих розмірів називають ямою.

Лощина – витягнуте заглиблення, яке знижується в одному напрямку. Лінія по дну, яка поєднує найнижчі точки лощини, називається водозливом. Не будь-яким водозливом тече вода, але будь-яка річка, струмок тече водозливом. До різних видів лощин належать долини, ущелини, яри та балки.

Сідловина – зниження на гребені хребта між двома сусідніми вершинами. Найнижча точка сідловини називається перевалом. У гірській місцевості шляхи сполучення через хребти, як правило, йдуть перевалами. Низько розташовані сідловини по обох схилах хребта або між двома гірськими хребтами називають гірськими проходами.

Характерні лінії (вододіли й водозливи) і точки (вершини, дно улоговин, перевали) рельєфу складають ніби скелет рельєфу, їх зображення і взаємне розташування визначає загальний характер рельєфу місцевості.

За характером рельєфу місцевість поділяють на рівнинну, горбкувату і гірську, яка в свою чергу поділяється на низькогірну, середньогірну і високогірну.

Рівнинна місцевість характеризується відсутністю різко виражених нерівностей земної поверхні, відносно невеликими перевищеннями (до 25 м) і порівняно малою стрімкістю схилів (до 20). Абсолютні висоти над рівнем моря – до 300 м.

Горбкувата місцевість характеризується хвилястим характером земної поверхні, яка утворює нерівності (горби) з абсолютними висотами до 500 м, відносними



перевищеннями 25-200 м і переважною стрімкістю схилів 2-3°. Низькогірна місцевість характеризується висотами над рівнем моря 500-1000 м, відносними перевищеннями 200-500 м, переважною стрімкістю схилів 5-10°. Порівняно з іншими видами гірської місцевості вона слабо розчленована, як правило, добре обжита і має досить розвинену мережу доріг. При відносно пологих схилах і невеликих висотах така місцевість практично доступна.

Середньогірна місцевість має висоти над рівнем моря приблизно 1000-2000 м, відносні перевищення від 500 до 1000 м і переважну стрімкість схилів 10-25°. Вона розчленована на добре виражені гірські масиви, пасма, їхні піки і гребені мають зглажені форми. Така місцевість часто має широкі гірські проходи, які використовуються для прокладання доріг. Ці дороги часто перетинають гірські хребти через перевали, які доступні для техніки протягом усього року або більшої його частини. Однак застосування техніки можливе лише на окремих напрямках. Загалом середньогірська місцевість потребує значних інженерних робіт для забезпечення її прохідності.

Високогірна місцевість характеризується висотами над рівнем моря понад 2000 м, відносними перевищеннями 1000 м і більше, зі стрімкістю схилів понад 25°. Високогірна місцевість розділена глибокими долинами й улоговинами на гірські хребти, їх піки і гребені часто вкриті снігом. Така місцевість, як правило, мало обжита, має мало гірських проходів і дуже рідку мережу доріг. Дороги вузькі і прокладені уздовж річок міжгір'ями, проходять через перевали, які розташовані на великих висотах, з крутими підйомами й малими радіусами поворотів. Перевали найчастіше розташовані вище снігової лінії і тому більшу частину року закриті.

Слабопересічена місцевість небагата на природні та штучні перешкоди, які легко здолати технікою в будь-якому напрямку. Рельєф місцевості звичайно рівнинний, рідше горбистий, природні перешкоди займають менше 10% від усїєї площі. Місцевість забезпечує задовільний огляд з командних висот, орієнтування.

Середньопересічена місцевість має близько 20% площі, зайнятої природними перешкодами. Це найпоширеніший різновид добре обжитої місцевості. Рельєф, як правило, горбистий, зрідка рівнинний.

Сильнопересічена місцевість відрізняється великою кількістю важкопрохідних природних перешкод – від ярів, ровів і балок до річок, каналів.

За умовами місцевість поділяють на відкриту, напівзакриту і закриту.

Відкрита місцевість являє собою рівну або злегка горбисту безлісну територію, до 75% площі якої добре проглядається в усіх напрямках з висот. На такій місцевості забезпечується добре спостереження.

Напівзакрита місцевість є перехідною від відкритої до закритої. Здебільшого на напівзакритій місцевості площа, яка зайнята природними схованками, складає близько 20%; з висот проглядається до 50% простору.

Закрита місцевість – це територія з гірським, горбистим або рівнинним рельєфом, вкрита лісами, чагарниками, садами з часто розташованими населеними пунктами. На такій місцевості площа, зайнята природними сховами, складає 30% і більше, а площа, що проглядається з командних висот, менша за 25%.

За ознакою прохідності місцевість поділяють на легкопрохідну, прохідну, важкопрохідну і непрохідну.

Легкопрохідна місцевість не обмежує швидкість і напрямок руху колісних та гусеничних машин, припускає безперепонне застосування техніки в розгорнутих строях і рух колон без зміцнення ґрунту.

Прохідна місцевість майже не обмежує швидкість, напрямок руху і дозволяє повторний рух по одному сліду гусеничних машин, хоча окремі місця потрібно



обходити чи зміцнювати. Рух колісних машин звичайної прохідності дещо ускладнений.

Важкопрохідна місцевість доступна для руху машин з невеликою швидкістю, обмежує свободу маневру і рух кількох машин по одному сліду. Рух колісних машин звичайної прохідності майже неможливий.

Непрохідна місцевість недоступна для руху гусеничних і колісних машин без виконання значних робіт з обладнання доріг.

**Обґрунтування вибору топографічних карт для створення цифрового рельєфу місцевості.** Існує декілька методів отримання цифрового рельєфу місцевості (ЦРМ).

Багато типів джерел початкових даних про рельєф спричинено різноманіттям способів отримання і організації первинних вимірювальних відомостей і їх похідних. Серед них геодезичні роботи і топографічна зйомка місцевості, стереофотограмметрична обробка знімків фототеодолітів, аеро- і космічних, альтиметричних зйомок (рельєфів суші), промірні роботи і ехолотування підводного рельєфу акваторій океанів і внутрішніх водоймищ, радіолокаційна зйомка рельєфу, льодовикового ложа і небесних тіл. Можна відмітити широко вживану супутникову і авіаційну стереозйомку (як оптичну, так і радіолокаційну), а також повітряне лазерне сканування, що характеризується, з одного боку, максимально високою точністю, а з іншого – дуже високою вартістю.

Тому методи створення ЦРМ засновані на даних ДЗЗ у теперішній час мало кому доступні, крім власників космічних апаратів.

Підґрунтя іншого методу створення ЦРМ складають топографічні карти і плани.

Однією з перешкод до використання їх для створення ЦРМ є секретність топографічних карт, зумовлена деякими специфічними особливостями їх змісту. Проте проблему можна розв'язати, якщо не включати секретну інформацію в ЦРМ відкритого використання. Такий підхід до засекречування цифрових карт вже пропонувався багатьма ГІС - спеціалістами, і обговорюється на конференціях, присвячених цьому питанню. За ЦРМ відкритого доступу треба залишити тільки ті об'єкти топографічних карт і їх характеристики, які не підпадають під режим секретності і не є надлишковими.

Географічна карта – це зменшена узагальнена модель земної поверхні на площині, яка відображає за допомогою умовних знаків розміщення, взаємозв'язки, якісні й кількісні характеристики різних природних і суспільних явищ. Карта – це одна з моделей дійсності, тому залежно від того, що потрібно змоделювати у конкретному випадку, створюють різні види карт.

Основною відзнакою карти є картографічне зображення, тобто зображення, виконане за допомогою певних графічних та інших засобів (умовних позначень або знаків), якими передають просторове розміщення, якісні та кількісні відмінності конкретних об'єктів.

Складовими (елементами) карти є картографічне зображення, математична основа, легенда та додаткові дані. Також кожна географічна карта має певні властивості. По-перше, карта є математично обґрунтованим зображенням. Саме за математичними законами розраховується ступінь зменшення розмірів реальних об'єктів, або їхній масштаб, при переході до картографічного зображення. Математичне обґрунтування мають картографічні проекції, за якими на картах подають "просторове розміщення дво- і тривимірних об'єктів реального світу (Земля в цілому, рельєф її поверхні тощо) на двовірній площині карти. По-друге, карта надає узагальнену картину дійсності або її складових.

На одній карті, навіть з мінімальним ступенем зменшення, неможливо

відобразити всі набуті людиною знання про предмети, явища чи процеси, які входять у коло її наукових чи практичних інтересів. Зважаючи на це, необхідним стає відбір об'єктів картографування, що супроводжується узагальненням характеристик, за якими ці об'єкти об'єднуються в певні групи (наприклад, будинки чи дерева взагалі, а не окреме дерево чи будинок, з притаманними тільки кожному з них ознаками).

Просторово-часова подібність картографічного зображення, тобто правильне відображення стану об'єкта в певний відрізок часу, на певну дату та подання на картах зв'язків, територіальної підпорядкованості, взаємного розміщення об'єктів.

Абстрактність зображення пов'язана з картографічною генералізацією. Вона полягає у відкиданні несуттєвих рис об'єкта, малозначущих подробиць, цілеспрямованому узагальненні характеристик.

Метричність карт дозволяє визначити за їх допомогою якісні й кількісні відмінності об'єктів.

Безперервність – це властивість, змістом якої є відсутність пропусків і розривів зображення (за винятком тих, що зумовлені картографічною проекцією).

Наочність забезпечує зорове сприйняття картографічного зображення просторових форм об'єктів, їхніх розмірів, розміщення, зв'язків. Читаність карти полегшує розпізнавання елементів і деталей зображення. Ця властивість тісно пов'язана з попередньою.

Оглядовість карти дозволяє одним поглядом охопити будь-яку за площею територію: від невеликої ділянки до планети в цілому тощо.

Інформативність карти забезпечується розміщенням на одиниці її площі значної кількості знаків, назв, кількісних показників і підвищується шляхом поєднання або перекриття знаків.

Ізолінії карти – це лінії, що з'єднують на карті точки з однаковими значеннями певних величин. Наприклад, горизонталі – точки висот, ізотерми – точки температури.

Одна з найголовніших переваг карт полягає в наявності системи координат. Географічні координати – широта й довгота – це кутові величини, що визначають положення будь-якої точки щодо екватора й початкового меридіана. Географічна широта – це кут між прямовисною лінією в даній точці й площиною екватора. А географічна довгота – кут між площиною меридіана, що проходить через дану точку, й площиною початкового меридіана. Широти та довготи визначаються за даними астрономічних і геодезичних спостережень, а на географічні карти наносять лінії паралелей і меридіанів. Ці лінії наносяться на карти й утворюють картографічну сітку.

В середньому ціни на топографічні карти різноманітні, але всі ціни стоять у межах від 100 до 1000 грн. Також можна відмітити, що паперові топографічні карти продають майже у всіх канцелярських магазинах.

**Висновки.** Отже, ознайомившись з двома вище перерахованими методами отримання інформації, можна зробити висновок щодо вибору кінцевого методу. Метод дистанційного зондування набагато функціональніший і точніший, але має багато недоліків у сфері отримання цих даних. Отримати дані альтиметричної зйомки з супутника практично неможливо, а супутникові стереографічні знімки – можливо, але за дуже великі кошти. Тобто метод отримання даних за допомогою дистанційного зондування є важкодоступним.

Доцільніше використовувати метод набагато дешевший і практичніший – складання ЦРМ на основі топографічних карт.

## Список літератури

1. *Картографическая съёмка* рельефа местности. [Электронный ресурс] - Режим доступа: [http://universal\\_ru\\_en\\_academic.ru](http://universal_ru_en_academic.ru).
2. А.М. Берлянт. Картография, М., Аспент пресс, 2002, 336 с.
3. *Картографическая генерализация*. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://userdoc.ru/astromoiya/2614/index.html>.
4. *Метод визуализации рельефа* ТАЛКА-ГИС. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://gis.talca2000.ru/metvizva.html>.
5. *3D модель* рельефа заданной местности. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://works.doklad.ru/view/bBEv/ZsSYam/html>.
6. ООО "ТВИС". [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.tvis.com.ua/sitemap.htm>
7. ООО "ТВИС" Космические данные спутника GEOEYE-1. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.tvis.com.ua/sd\\_gemain.htm](http://www.tvis.com.ua/sd_gemain.htm)
8. ООО "ТВИС" Космические данные спутников WORLDVIEW. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.tvis.com.ua/sd\\_wvmain.htm](http://www.tvis.com.ua/sd_wvmain.htm)
9. ООО "ТВИС" Космические данные спутника EROS B. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.tvis.com.ua/sd\\_ebmain.htm](http://www.tvis.com.ua/sd_ebmain.htm)
10. ООО "ТВИС" Космические данные спутника ALOS. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.tvis.com.ua/sd\\_almain.htm](http://www.tvis.com.ua/sd_almain.htm)
11. ООО "ТВИС" Космические данные спутника IRS. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.tvis.com.ua/sd\\_irsmain.htm](http://www.tvis.com.ua/sd_irsmain.htm)
12. Компания «Совзонд»: Космические снимки. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.sovzond.ru/satellites/>

**Оценка возможности использования различных топографических данных для создания цифрового рельефа местности. Лимонов А.С., Б.В. Перельгин, Пустовит Т.М.**

*В статье оценивается возможность использования различных топографических данных для создания цифрового рельефа местности.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, разрешающая способность, топографические элементы местности, цифровой рельеф местности.

**Estimation of different topography data application ability for locality digital relief creation. Limonov A.S., Perelygin B.V., Pustovit T.M.**

*In article ability of different topography data for creation of locality digital relief estimation is investigated.*

**Key words:** Earth distance sensing, resolution, surface topography elements, locality digital relief.