ISSN 2220-5861

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ИНСТИТУТ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 2 (48)

Севастополь

2022

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ № 2 (48) 2022

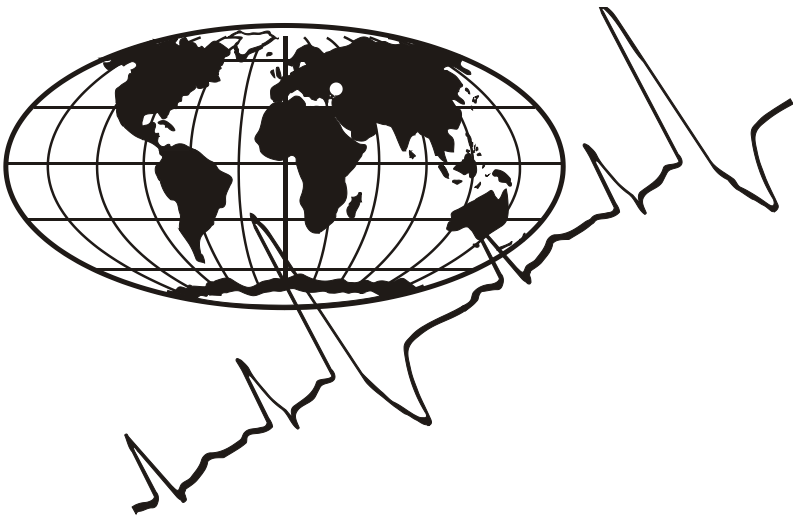
ISSN 2220-5861

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ИНСТИТУТ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 2 (48)



Севастополь

2022

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 2 (48) 2022

Журнал научно-технический основан в 1998 г.
Языки: русский, английский
Периодичность: 4 раза в год
ISSN 2220-5861

Журнал посвящен 300-летнему юбилею Российской академии наук.

В журнале публикуются результаты работ по созданию и использованию систем мониторинга окружающей среды, включая методы и средства контроля природной среды, климата и техногенных объектов, систем экологического мониторинга, их алгоритмического, программного, метрологического и информационного обеспечения.

Главный редактор Полонский А.Б., д.г.н., чл.-корр. РАН

Редакционная коллегия:

Белан Б.Д., д.ф.-м.н., Воскресенская Е.Н., д.г.н.,
Гайский В.А., д.т.н. (зам. гл. редактора), Гимпилевич Ю.Б., д.т.н.,
Греков Н.А., д.т.н., Дрюккер В.В., д.б.н., Евстигнеев М.П., д.ф.-м.н.,
Егоров В.Н., д.б.н., Кебкал К.Г., д.т.н., Копп В.Я., д.т.н.,
Краснодубец Л.А., д.т.н., Левашов Д.Е., д.т.н.,
Нестеров Е.С., д.г.н., Римский-Корсаков Н.А., д.т.н.,
Романовская А.А., д.б.н., Рыбак О.О., д.ф.-м.н., Скатков А.В., д.т.н.,
Цао Сюань (Cao Xuan), д.н., Мин Лю (Ming Liu), д.н.,
Сон Джун (Song Jun), д.н.,

Учредитель: Институт природно-технических систем (ИПТС)

Издатель: Институт природно-технических систем (ИПТС)

Почтовый адрес: 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-63023 от 10 сентября 2015 г.

Журнал размещен в каталоге научной периодики РИНЦ на платформе научной электронной информации eLibrary.ru.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 01.02.2022 г. по научной специальности: 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки).

В журнале публикуются материалы, прошедшие внешнее рецензирование.

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,298. Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,370.

© Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт природно-технических систем» (ИПТС), 2022

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Научные основы методов контроля природной среды и климата

Е.В. Вышкваркова, О.Ю. Сухонос, Е.Н. Воскресенская. Оценка будущих изменений совместных экстремумов температуры воздуха и атмосферных осадков в XXI веке для Севастопольского региона 5

А.Б. Полонский, Е.А. Гребнева. О межгодовой изменчивости величины pH в поверхностном слое глубоководной части Черного моря 12

А.М. Лях, И.В. Агаркова-Лях. Таксономическая база данных о диатомовых микроводорослях водоемов Крыма 22

С.С. Назирова, Д.С. Бычек, Л.Р. Асфандиярова, Л.З. Касьянова, А.А. Исламутдинова, Э.К. Аминова. Возможности производства биоразлагаемого материала из отходов деревообрабатывающей промышленности. 31

Технические средства систем контроля природной среды

В.А. Гайский. Метод и устройства с тензорезисторными датчиками для измерения гидростатического давления. 36

В.И. Истомин, А.Г. Клименко, С.Е. Тверская, В.В. Хлебникова. Совершенствование методов и приборов контроля концентрации нефтепродуктов в очищенной воде 46

Системы экологического мониторинга

А.Е. Щодро, С.А. Шоларь. Современные гидроэкологические сооружения для активизации массообмена в водной среде 51

А.Г. Клименко, В.А. Очеретяный. Правовые, экологические аспекты и особенности декарбонизации энергетики и транспорта в Российской Федерации 61

И.В. Агаркова-Лях, К.В. Фролова, А.М. Лях. Адаптации береговой растительности к экологическим условиям контактной зоны «суша-море» . . 73

А.Р. Шагидуллин. Динамика уровней загрязнения основными газовыми примесями и показателей рассеивающей способности атмосферного воздуха в г. Казани 84

Алгоритмическое и программное обеспечение в системах контроля природной среды

А.В. Скатков, Ю.В. Доронина, Д.В. Моисеев. О свойстве идемпотентности систем контроля окружающей среды 92

Информационная и метрологическая надежность систем контроля природной среды

В.И. Швецова. Теоретические основы оптимизации структур эргатических систем контроля. 101

Алфавитный указатель авторов 109

УДК 551.583 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-5-11

ОЦЕНКА БУДУЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ СОВМЕСТНЫХ ЭКСТРЕМУМОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В XXI ВЕКЕ ДЛЯ СЕВАСТОПОЛЬСКОГО РЕГИОНА

Е.В. Вышкваркова[1,2], О.Ю. Сухонос[1,2], Е.Н. Воскресенская[1,2]

[1]Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
[2]Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: aveiro_7@mail.ru

На основе данных расчетов региональных климатических моделей среднемесячных значений температуры воздуха и атмосферных осадков проекта CORDEX получены проекции изменения частоты совместных экстремумов к середине и концу XXI века при разных сценариях концентрации парниковых газов для Севастопольского региона. В качестве пороговых значений взяты 25-й и 75-й процентили указанных характеристик. Результаты показали уменьшение частоты «холодных» индексов (cold-dry CD и cold-wet CW) и увеличение количества месяцев с совместными экстремумами в будущие периоды относительно базового периода для «теплых» индексов (warm-dry WD и warm-wet WW) для всех сезонов.

Ключевые слова: совместные экстремумы, температура воздуха, осадки, проекции, Севастопольский регион, CORDEX

Поступила в редакцию: 21.04.2022.

Введение. Экстремальные значения, наблюдаемые одновременно в полях осадков и температуры воздуха, ассоциируются с многомерными явлениями и могут сочетать в себе разные временные масштабы, например, формирование блокирующего антициклона совместно с засушливыми и жаркими погодными условиями [1]. В последнее время большое распространение получили исследования одновременных или последовательных экстремальных событий температуры воздуха и осадков, так называемые совместные экстремумы [2]. Анализ совместных распределений величин температуры воздуха и осадков позволяет точнее описать условия, чем анализ распределений этих параметров по отдельности [3]. Засухи и волны тепла в Европе в 2003 и 2015 гг., в России в 2010 г. являются примерами совместного возникновения экстремальных значений температуры воздуха и осадков (их отсутствие), которые привели к значительным человеческим жертвам и экономическому ущербу. Так, сохранение высоких температур продолжительное время оказывает негативное воздействие на сердечно-сосудистую систему человека, особенно пожилых людей, отсутствие осадков и/или их незначительное количество сказывается на урожайности сельскохозяйственных культур, при высоких температурах воздуха увеличивается потребление электроэнергии. Помимо этого, продолжительное сохранение сухих и жарких условий может способствовать возникновению и распространению лесных пожаров, которые мы наблюдаем последние годы в летний сезон на территории России и Европейских стран. Сочетание высоких температур и обильных осадков также наносит ущерб обществу, например возникновение наводнений и селевых потоков при выпадении большого количества осадков в теплое время года.

Наблюдаемое и прогнозируемое повышение температуры воздуха и изменение режима осадков вероятно приведут к увеличению частоты совместных экстремумов в различных районах земного шара [4]. Исследования будущих изменений частоты совместных экстремумов, проведенные с использованием данных модельных расчетов проектов CMIP5 и CMIP6, показали существенный рост частоты экстремумов, сочета-

ющих теплые/сухие и теплые/влажные условия во многих регионах [5, 6 и другие].

Цель работы – оценка возможных будущих изменений совместных экстремумов температуры воздуха и осадков в Севастопольском регионе к середине и концу XXI века с использованием данных моделирования региональных климатических моделей проекта CORDEX.

Данные и методы. Для оценки будущих изменений частоты совместных экстремумов использованы данные климатического моделирования среднемесячных значений температуры воздуха и осадков исследовательской программы Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX). Результаты моделирования получены при помощи веб-приложения, которое предоставляет временные ряды основных климатических переменных и климатических индексов на основе моделирования региональных климатических моделей с высоким горизонтальным разрешением DEAR-Clima [7]. Данные региональных климатических моделей имеют пространственное разрешение (0,11°) по территории Европейского региона и охватывают период 1950–2100 гг. Эксперименты по моделированию являются результатом комбинирования различных региональных и глобальных климатических моделей.

Результаты для будущего периода получены под влиянием трех репрезентативных траекторий концентрации парниковых газов (RCP), принятых IPCC в пятом оценочном отчете [4] – RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5. В работе использованы расчетные данные по сценариям концентрации парниковых газов RCP4.5 (умеренно оптимистичный) и RCP8.5 (пессимистичный) для точки в Севастопольском регионе (координаты 44,592 с.ш., 33,488 в.д., высота над уровнем моря 75 м). Ансамбль из десяти региональных климатических моделей рассчитан для каждого метеорологического параметра. Использование ансамбля результатов моделей позволяет уменьшить неопределенность, связанную с любой отдельной моделью [8]. Перечень региональных моделей, использованных в работе, представлен в табл. 1.

Таблица 1. Использованные региональные климатические модели

Глобальные климатические модели	Региональные климатические модели
ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E
MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REMO2009 CLMcom-CCLM4-8-17
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN53 CLMcom-CCLM4-8-17 SMHI-RCA4
IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-INERIS-WRF331F SMHI-RCA4
MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17 SMHI-RCA4

Для выявления совместных экстремумов использованы четыре комбинации: CD (cold/dry), CW (cold/wet), WD (warm/dry) и WW (warm/wet) [9]. Влажным (Wet) экстремумом считается количество осадков выше 75-го процентиля, а сухой (Dry) экстремум возникает, когда количество осадков ниже 25-го процентиля. Аналогично, экстремально высокая температура (Warm) возникает, когда температура выше 75-го процентиля, а экстремально низкая температура (Cold) при температура ниже 25-го процентиля. Таким образом, совместный экстремум определяется как совпадение двух экстремумов в одном и том же месяце. Процентили температуры воздуха и осадков (25-й и 75-й) рассчитаны для каждого месяца базового периода 1981–2005 гг. В качестве будущих периодов выбраны 2021–2050 и 2051–2080 гг. Частота совместных экстремумов опреде-

лялась как сумма месяцев за сезон, в которых происходят совпадение событий. Совместные экстремумы рассчитаны для всех сезонов. Визуализация сравнения данных наблюдений и модельных расчетов проведена с использованием диаграмм Тейлора, которые позволяют графически представить качество воспроизведения моделью или ансамблем моделей данных наблюдений [10]. Диаграммы Тейлора построены в программе MATLAB.

Результаты и обсуждение. Сравнение данных наблюдений и модельных приведено на рис. 1 и 2. Для сравнения использованы данные наблюдений с метеостанции Севастополь (координаты 44,62 с.ш., 33,53 в.д.). Все модели хорошо воспроизводят среднемесячные температуры воздуха (рис. 1а). Все модели, кроме MPI/MPI имеют значения коэффициента корреляции 0,9 и выше, низкую среднеквадратическую ошибку RMSD (<1) и стандартное отклонение от 0,75 до 1. Ансамбль моделей (буква К на диаграмме Тейлора) имеет наибольшую величину коэффициента корреляции (больше 0,95) и наименьшее значение RMSD (около 0,3). Качество воспроизведения региональными климатическими моделями среднемесячных сумм осадков хуже (рис. 1б). Коэффициенты корреляции находятся в диапазоне от 0 до 0,15, а модель CNRM/CNRM имеет отрицательное значение, значения RMSD выше 1.

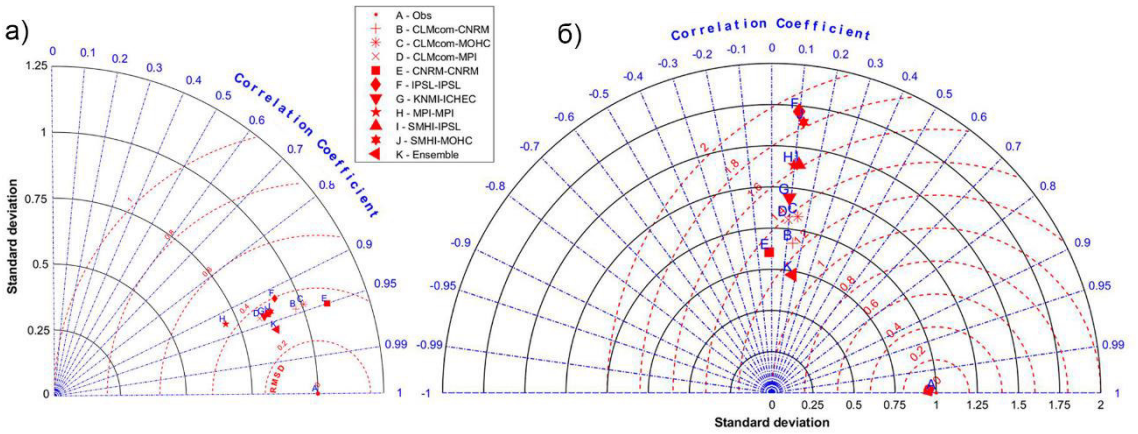


Рис. 1. Диаграммы Тейлора сравнения моделей и данных наблюдений среднемесячных величин температуры воздуха и атмосферных осадков за период 1981–2005 гг.
Полные названия моделей приведены в табл. 1

Fig. 1. Taylor diagrams for comparison of models and observational data of average monthly values of air temperature and precipitation for the period 1981–2005.
The full names of the models are given in Table 1

Все модели хорошо отражают внутригодовой ход средней температуры воздуха в Севастопольском регионе (рис. 2а). Коэффициент корреляции данных наблюдений и ансамбля моделей составляет 0,99. Осадки воспроизводятся моделями хуже, чем температура, многие из них не отображают второй пик во внутригодовом ходе, который приходится на июнь (рис. 2б). Коэффициент корреляции между данными наблюдений и ансамблем моделей составляет 0,11. Подобный результат ожидаем, поскольку осадки характеризуются сильной пространственной неоднородностью. Сопоставление линейных трендов наблюдений и ансамбля модельных данных показало совпадение тенденций за исторический период (1981–2005 гг.). Проведенные тесты позволяют использовать ансамбль модельных данных атмосферных осадков для дальнейших расчетов. В результате, получены частота совместных экстремумов к середине и концу XXI века для Севастопольского региона при разных RCP (табл. 2).

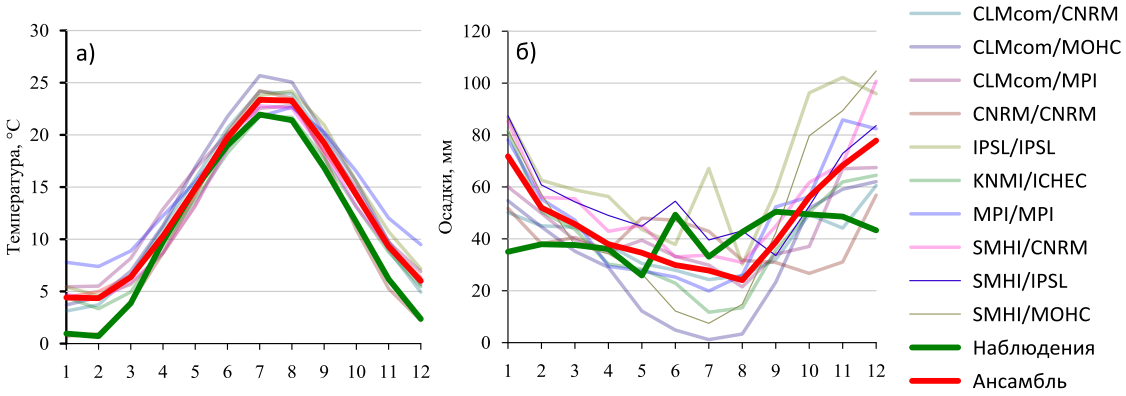


Рис. 2. Сравнение внутригодового хода температуры воздуха (а) и осадков (б) модельных расчетов и данных наблюдений за период 1981–2005 гг. Полные названия моделей приведены в табл. 1
Fig. 2. Comparison of intraannual variation of air temperature (a) and precipitation (b) of model calculations and observational data for the period 1981–2005. The full names of the models are given in Table 1

Таблица 2. Количество месяцев с совместными экстремумами в базовый и будущие периоды при разных RCP

Сезон	Индекс	1981–2005 гг.	2021–2050 гг.		2051–2080 гг.	
			RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
зима	CD	8	1	1	0	0
	CW	5	0	3	0	0
	WD	4	16	11	16	20
	WW	5	27	29	32	37
весна	CD	5	0	0	0	0
	CW	7	0	0	0	0
	WD	6	11	19	15	11
	WW	7	33	25	37	39
лето	CD	5	0	0	0	0
	CW	8	0	0	0	0
	WD	6	18	18	20	23
	WW	4	20	30	24	24
осень	CD	5	0	0	0	0
	CW	6	2	0	0	0
	WD	10	10	22	16	8
	WW	1	32	28	43	37

Зимой в первый будущий период (2021–2050 гг.) ожидается сокращение количества месяцев с индексов CD относительно базового периода с 8 до 1 (то есть на 87,5%) при обоих сценариях RCP. Количество месяцев с индексом CW в первый будущий период уменьшается до нуля при RCP4.5 и до 3 при RCP8.5. Во второй будущий период не ожидается месяцев с «холодными» индексами (CD и CW). «Теплые» индексы, наоборот, демонстрируют возможный рост количества месяцев в будущие периоды при двух сценариях RCP. Возможное увеличение индекса WD составляет от 175 до 400% относительно базового периода, а индекса WW – до 500% (с 6 месяцев до 37 во второй будущий период при RCP8.5).

В весенний и летний сезоны по данным модельных расчетов в будущие периоды не ожидается случаев с индексами CD и CW. Также, как и для зимнего сезона характерно возможное увеличение количества месяцев с «теплыми» индексами при обоих RCP, с немного

более низкими показателями. Абсолютные величины количества месяцев, прогнозируемые в будущие периоды в летний сезон немного ниже, чем в другие сезоны (не выше 30 случаев), однако в процентном выражении относительно базового периода увеличение составляет до 650% при сценарии RCP8.5 во второй будущий период. В осенний сезон практически не ожидается случаев с «холодными индексами» в будущие периоды, за исключением индекса CW в период 2021–2050 при RCP4.5 (два случая). В первый будущий период при RCP4.5 не прогнозируется роста индекса WD относительно базового периода, а при RCP8.5 рост на 120%. Во второй будущий период при RCP4.5 рост на 60%, а при пессимистичном RCP8.5 уменьшение на 25%. Индекс совместных экстремумов, сочетающих температуру воздуха и осадки выше 75-го процентиля (WW), по данным моделей показывает наибольший рост относительно базового периода при обоих RCP – с одного случая до 37–43 случаев во второй будущий период.

В условиях глобального потепления, появляется все больше данных, подтверждающих возможное увеличение количества совместных экстремумов «тепло/сухо» и «тепло/влажно» в глобальном масштабе. Увеличение совместных экстремумов сочетающих wet-warm и warm-dry ожидается по всему земному шару по данным глобального исследования на основе моделей из проекта CMIP6 к концу XXI века (2081–2100 гг.) [11]. По мнению Manning et al. [12] основным фактором изменчивости совместных экстремумов в Европе является повышение температуры воздуха. Увеличение частоты количества совместных экстремумов, сочетающих жаркие и засушливые условия, во многих регионах, включая центральную Европу, происходит вследствие усиления зависимости между осадками и температурой [13]. Более частое возникновение этих двух совместных экстремумов в условиях потепления климата, выявленное в ходе исследования, может повлиять как на естественные, так и человеческие системы. Например, более высокая частота «теплых» совместных экстремумов может привести к сокращению производства сельскохозяйственных культур и поставить под угрозу продовольственную безопасность. Севастопольский регион, для которого специализацией сельского хозяйства является виноградарство, может столкнуться с увеличением тепловым стрессом для виноградной лозы в будущие периоды [14]. Помимо этого, увеличение температурных экстремумов скажется на биоклиматических условиях, негативно влияющих на самоощущение человека, что актуально для Севастополя, как курортного города [15].

Заключение. На основании результатов расчетов региональных климатических моделей проекта CORDEX получены проекции частоты совместных экстремумов для Севастопольского региона к середине и концу XXI века при двух сценариях концентрации парниковых газов. Показано уменьшение частоты «холодных» индексов (CD и CW) в оба будущие периоды, и увеличение количества месяцев с совместными экстремумами в будущие периоды относительно базового периода для «теплых» индексов, с температурой выше 75-го процентиля, – WD и WW для всех сезонов. Увеличение индексов WD и WW, по-видимому, связано с увеличением средних значений и изменчивости температуры. Результаты могут быть полезны при разработке вариантов адаптации и смягчения последствий изменения климата в регионе.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПТС (№ ГР 121122300072-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zscheischler J., Martius O., Westra S., Bevacqua E., Raymond C., Horton R.M., van den Hurk B., AghaKouchak A., Jézéquel A., Mahecha M.D., Maraun D., Ramos A.M., Ridder N.N., Thiery W. Vignotto E.* A typology of compound weather and climate events // Nat. Rev. Earth Environ. 2020. Vol. 1. P. 333–347.

2. *Hao Z., AghaKouchak A., Phillips T.J.* Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes // Environ. Res. Lett. 2013. Vol. 8. P. 034014.

3. *Hao Z., Singh V.P., Hao F.* Compound Extremes in Hydroclimatology: A Review // Water. 2018. Vol. 10. P. 718.

4. IPCC Climate Change 2014: Synthesis Report, 2014: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Core Writing Team. Pachauri RK, Meyer LA (Eds). Geneva, Switzerland, 151p.

5. *Zhan W., He X., Sheffield J., Wood E.F.* Projected seasonal changes in largescale global precipitation and temperature extremes based on the CMIP5 ensemble // J. Clim. 2020. Vol. 33 (13). P. 5651–5671.

6. *Wu X., Hao Z., Tang Q., Singh V.P., Zhang X., Hao F.* Projected increase in compound dry and hot events over global land areas // Int. J. Climatol. 2021. Vol. 41 (1). P. 393–403.

7. DEAR-Clima (http://meteo3.geo.auth.gr:3838/ (дата обращения: 21.03.2022).

8. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections; National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, 2010.

9. *Beniston M.* Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100 // Geophys Res Lett. 2009. Vol. 36. P. L07707.

10. *Taylor K.E.* Summarising multiple aspects of model performance in a single diagram // J. Geophys. Research. Atmos. 2001. Vol. 106. P. 7183–7192.

11. *Meng Y., Hao Z., Feng S., Zhang X., Hao F.* Increase in compound dry-warm and wet-warm events under global warming in CMIP6 models // Global and Planetary Change. 2022. Vol. 210. P. 103773.

12. *Manning C., Widmann M., Bevacqua E., Van Loon A.F., Maraun D., Vrac M.l.* Increased probability of compound long-duration dry and hot events in Europe during summer (1950–2013) // Environmental Research Letters. 2019. Vol. 14 (9). P. 094006.

13. *Zscheischler J., Seneviratne S.I.* Dependence of drivers affects risks associated with compound events // Sci. Adv. 2017. Vol. 3 (6). P.1700263.

14. *Vyshkvarkova E., Rybalko E.* Forecast of changes in air temperatures and heat indices in the Sevastopol region in the 21st century and their impacts on viticulture // Agronomy. 2021. Vol. 11. P. 954.

15. *Стефанович А.А., Воскресенская Е.Н.* Биоклиматическая оценка комфортности рекреационных условий Крыма // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 2 (36). С. 81–87.

ASSESSMENT OF FUTURE CHANGES IN COMPOUND EXTREMES OF AIR TEMPERATURE AND PRECITATION IN THE XXI CENTURY FOR THE SEVASTOPOL REGION

E.V. Vyshkvarkova[1,2], O.Yu. Sukhonos[1,2], E.N. Voskresenskaya[1,2]

[1]Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28
[2]Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

Based on the data of calculations of regional climate models of average monthly values of air temperature and precipitation of the CORDEX project, projections of changes in the frequency of compound extremes by the middle and end of the 21st century were obtained under different scenarios of greenhouse gas concentrations for the Sevastopol region. The 25th and 75th percentiles of the indicated characteristics were taken as threshold values. The results showed a decrease in the frequency of "cold" indices (cold-dry CD and cold-wet CW) and an increase in the number of months with compound extremes in future periods relative to the base period for "warm" indices (warm-dry WD and warm-wet WW) for all seasons.

Keywords: compound extremes, air temperature, precipitation, projections, Sevastopol region, CORDEX

REFERENCES

1. *Zscheischler J., Martius O., Westra S., Bevacqua E., Raymond C., Horton R.M., van den Hurk B., AghaKouchak A., Jézéquel A., Mahecha M.D., Maraun D., Ramos A.M., Ridder N.N., Thiery W., and Vignotto E.* A typology of compound weather and climate events. *Nat. Rev. Earth Environ.*, 2020, Vol. 1, pp. 333–347.

2. *Hao Z., AghaKouchak A., and Phillips T.J.* Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes. *Environ. Res. Lett.*, 2013, Vol. 8, pp. 034014.

3. *Hao Z., Singh V.P., and Hao F.* Compound Extremes in Hydroclimatology: A Review. *Water*, 2018, Vol. 10, pp. 718.

4. IPCC Climate Change 2014: Synthesis Report, 2014: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Core Writing Team. Pachauri RK, Meyer LA (Eds). Geneva, Switzerland, 151 p.

5. *Zhan W., He X., Sheffield J., and Wood E.F.* Projected seasonal changes in largescale global precipitation and temperature extremes based on the CMIP5 ensemble. *J. Clim.,* 2020, Vol. 33 (13), pp. 5651–5671.

6. *Wu X., Hao Z., Tang Q., Singh V.P., Zhang X., and Hao F.* Projected increase in compound dry and hot events over global land areas. *Int. J. Climatol.*, 2021, Vol. 41 (1), pp. 393–403.

7. http://meteo3.geo.auth.gr:3838/ (March 21, 2022).

8. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections; National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, 2010.

9. *Beniston M.* Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901 and projected for 2100. *Geophys Res Lett*., 2009, Vol. 36, pp. L07707.

10. *Taylor K.E.* Summarising multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Research. Atmos,* 2001, Vol. 106, pp. 7183–7192.

11. *Meng Y., Hao Z., Feng S., Zhang X., and Hao F.* Increase in compound dry-warm and wet-warm events under global warming in CMIP6 models. *Global and Planetary Change,* 2022, Vol. 210, pp. 103773.

12. *Manning C., Widmann M., Bevacqua E., Van Loon A.F., Maraun D., and Vrac M.l.* Increased probability of compound long-duration dry and hot events in Europe during summer (1950–2013). *Environmental Research Letters*, 2019, Vol. 14(9), pp. 094006.

13. *Zscheischler J. and Seneviratne S.I.* Dependence of drivers affects risks associated with compound events. *Sci. Adv*, 2017, Vol. 3 (6), pp. 1700263.

14. *Vyshkvarkova E. and Rybalko E.* Forecast of changes in air temperatures and heat indices in the Sevastopol region in the 21st century and their impacts on viticulture. *Agronomy*, 2021, Vol. 11, pp. 954.

15. *Stefanovich A.A. and Voskresenskaya E.N.* Bioklimaticheskaja ocenka komfortnosti rekreacionnyh uslovij Kryma (Bioclimatic assessment of the comfort of recreational conditions in the Crimea). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2019, No. 2(36), pp. 81–87.

УДК 551.464.6/465.7(262.5) DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-12-21

О МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЕЛИЧИНЫ pH В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

А.Б. Полонский, Е.А. Гребнева

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: apolonsky5@mail.ru, lenagrebneva12@gmail.com

В результате пространственно-временной интерполяции архивных данных о величинах pH в поверхностном слое вод глубоководной части Черного моря сформирован эквидистантный временной ряд за период с 1957 по 1996 гг. с двухмесячным осреднением. Подтвержден ранее полученный результат о том, что по статистической структуре временной ряд делится на два 20-летних временных отрезка, различных по знаку долговременных тенденций и величине дисперсии. Первый из них начинается в 1957 г. и заканчивается в 1976 г., второй занимает следующие 20 лет (с 1977 по 1996 гг.). После удаления линейного тренда, пространственно-временной интерполяции с учетом годового цикла и добавлением к пропущенным значениям белого шума получен квазистационарный временной ряд pH. В результате спектрального анализа этого ряда выделена значимая (на 80%-ном доверительном уровне) квазипериодическая составляющая изменчивости величины pH поверхностного слоя открытой части Черного моря с периодом 10 лет.

Ключевые слова. Черное море, глубоководная часть, поверхностный слой, величина pH, стационарный временной ряд, годовой цикл, интерполяция, межгодовая изменчивость

Поступила в редакцию: 27.05.2022. После доработки: 21.06.2022.

Введение. Водородный показатель (pH) – один из важнейших характеристик морской воды. Рост концентраций парниковых газов в атмосфере и, в первую очередь, углекислого газа, изменение гидрохимических параметров, поступающих в море речных вод и атмосферных осадков, вариации региональных гидрометеорологических условий в процессе климатических изменений и другие процессы оказывают существенное влияние на гидролого-гидрохимическую структуру морских вод. Это проявляется, в частности, в вариациях pH, что оказывает существенное влияние на многие морские организмы. При понижении водородного показателя происходит их декальцификация, снижается выживаемость видов, ухудшаются условия развития морских организмов и уменьшается биоразнообразие [1, 2]. В связи с потенциальной угрозой растущего закисления морской воды для биоты величина pH в настоящее время признана одним из индикатором глобальных изменений, наряду с ростом температуры и повышением уровня моря.

В основном, современные исследования водородного показателя сосредоточены на получении глобальных климатических тенденций pH поверхностных слоев Мирового океана, которые являются прямым следствием поглощения морской водой возрастающего количества атмосферного CO_2. Согласно опубликованным оценкам за период с 1991 по 2011 гг. pH поверхности Мирового океана снижался в среднем со скоростью 0,0018 ±0,0004 год$^{-1}$ [3]. В Индийском океане за тот же период отрицательный тренд pH составил −0,0020 ±0,0002 год$^{-1}$. В Тихом океане с 1995 по 2020 гг. концентрация ионов водорода между Гавайскими островами и Аляской увеличилась на 6%. В поверхностных водах субполярной части Северной Атлантики за период с 1981 по 2007 гг. тренд pH составил −0,0022 ±0,0004 год$^{-1}$ [4]. Для акватории всей Северной Атлантики за период с 1993 по 2017 гг. величина pH снижалась со скоростью –0,017 ед. pH за десятилетие [5].

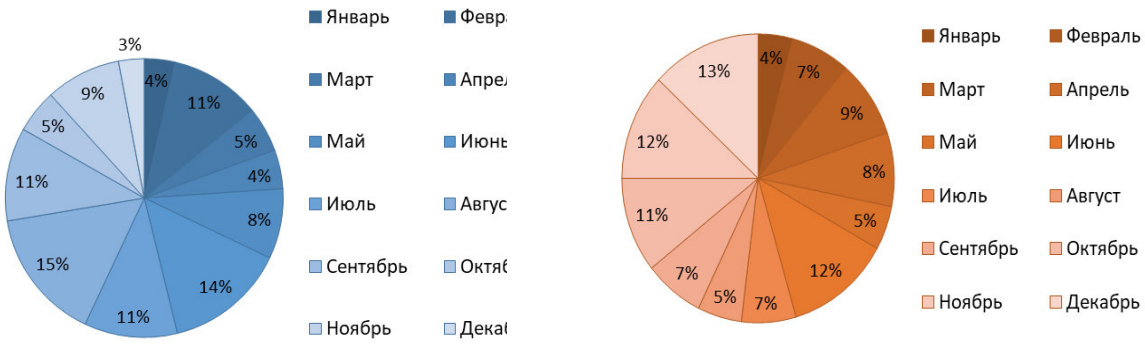
Черное море – внутренний бассейн Атлантического океана. В связи с недо-

статочным пространственно-временным разрешением экспериментальных данных по pH лишь в немногих региональных исследованиях даны оценки климатической тенденции pH на акватории Черного моря [6, 7]. Для наиболее длительного периода с 1977 по 2021 гг. такая тенденция получена в работе [8]. В результате декомпозиции временного ряда величины pH в глубоководной части Черного моря получен климатический тренд, который указывает на снижение величины pH за период с 1977 по 2021 гг. со средней скоростью порядка 0,01 ед. pH/10 лет. Ранее тренд величины pH в поверхностном слое Черного моря за период с 1956 по 2010 гг. был оценен от –0,013 до –0,017 ед. pH/10 лет [6, 7]. Для периода с 1990 по 2014 гг. получено, что значение pH поверхности моря уменьшилось на 0,07 ед. pH [9]. Вместе с тем, в работе [8] были выделены квазициклические компоненты изменчивости pH с периодом ~ 2,5 и 6,7 лет. Наиболее вероятно, что основная причина такой квазипериодической изменчивости величины pH в верхнем слое открытой части Черного моря – вариации региональных гидрометеорологических характеристик, обусловленных изменениями циклонической активности в Атлантико-Европейском секторе, включая Черноморский регион, в различные фазы климатических мод в системе океан–атмосфера. Однако, в этой работе выделение внутригодового цикла и интерполяция данных были осуществлены с недостаточно высоким временным разрешением, что может приводить к искажению оценок трендов и межгодовой изменчивости восстановленного ряда величины pH. Ясно, что анализ более надежных многолетних временных рядов необходимого разрешения может уточнить наши представления об отклике региональных гидрохимических циклов на изменчивость гидрометеорологических процессов, происходящих на фоне климатических трендов, и уточнить многолетние тенденции pH. В связи с этим, цель нашей работы заключается в формировании эквидистантного временного ряда величины pH, разрешающего внутригодовой цикл и позволяющего уточнить межгодовые низкочастотные вариации и тренды этой величины для глубоководной части Черного моря.

Материалы и методы. В работе использовались данные по величине pH в поверхностном слое вод из банка архивных данных Института природно-технических систем (ИПТС) [10]. Акватория исследования – глубоководная часть Черного моря, ограниченная изобатой 1000 м. В этой части моря на пространственно-временную изменчивость величины pH не так существенно влияют стоки рек и их вариации, как в прибрежных и шельфовых районах.

Сформированный массив содержит 6989 станций с измерениями величины pH в поверхностном слое Черного моря за период с 1957 по 1996 гг. Именно этот период, наиболее обеспеченный данными наблюдений по величине pH, будет анализироваться в настоящей работе.

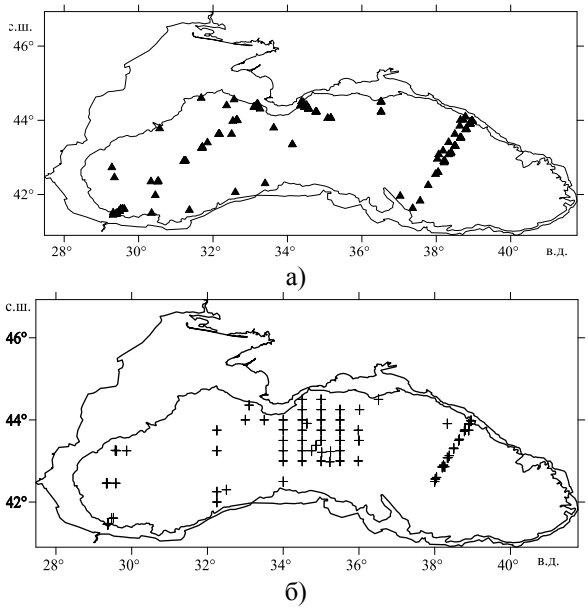
При анализе временного распределения данных наблюдений выявлено, что в первую половину изучаемого временного отрезка (с 1957 по 1976 гг.) наибольшее количество измерений в Черном море приходится на четыре теплых месяца (июнь – сентябрь). Эти измерения составляют 51% всех данных (рис. 1, а). Вторая половина (с 1977 по 1996 гг.) характеризуется более равномерным распределением измерений внутри года (рис. 1, б). Для этого временного интервала незначительно лидируют по количеству измерений следующие месяцы: октябрь (11% всех данных), ноябрь (12%) и декабрь (13%) (рис. 1, б). На рис. 1 показана диаграмма процентного соотношения обеспеченности измерениями величины pH по каждому месяцу года для первой и второй половины изучаемого периода, демонстрирующая временную неоднородность архивных наблюдений.



а) б)

Рис. 1. Круговая процентная диаграмма соотношения количества данных по величине pH для каждого месяца года для периодов с 1957 по 1976 гг. (а) и с 1977 по 1996 гг. (б)
Fig. 1. Circular percentage chart of the ratio of quantitative indicators by pH value for each month of the year for the periods from 1957 to 1976 (a) and from 1977 to 1996 (b)

Пространственное распределение станций также неравномерно. Для примера на рис. 2 показаны два типичных пространственных распределения станций с регистрацией величины pH, выполненных на протяжении месяца в августе 1966 г. (рис. 2, а) и в декабре 1988 г. (рис. 2, б). Для восстановления недостающих значений по акватории моря за каждый месяц анализируемого периода использовался метод пространственной интерполяции данных на основе локального полинома второй степени, который дает результаты, близкие к оптимальной интерполяции [11]. Интерполяция осуществлялась с использованием программного пакета Surfer [12]. Поля восстанавливались в узлах регулярной сетки для каждого месяца за период с 1957 по 1996 гг. Далее вычислялось среднее значение величины pH восстановленного по пространству поля для глубоководной части моря.



а)

б)

Рис. 2. Пространственное распределение станций, на которых измерялась величина pH на поверхности моря в августе 1966 г. (а) и декабре 1988 г. (б)
Fig. 2. Spatial distribution of stations at which the pH value was measured on the sea surface in August 1966 (a) and December 1988 (b)

Методика временной интерполяции. Наша задача состоит в необходимости получить эквидистантный временной ряд величины pH, разрешающий

годовой цикл. В качестве первого шага был выполнен анализ временного хода pH с двухмесячным шагом, осредненного по глубоководной части Черного моря за период с 1957 по 1996 гг. (рис. 3) Двухмесячный период осреднения (январь – февраль, март – апрель и так далее) с одной стороны увеличивает обеспеченность данными каждой приведенной на графике точки (по сравнению с месячным разрешением), а, с другой, позволяет точнее разрешить внутригодовой цикл (по сравнению с четырехмесячным разрешением, использованным в работе [8]).

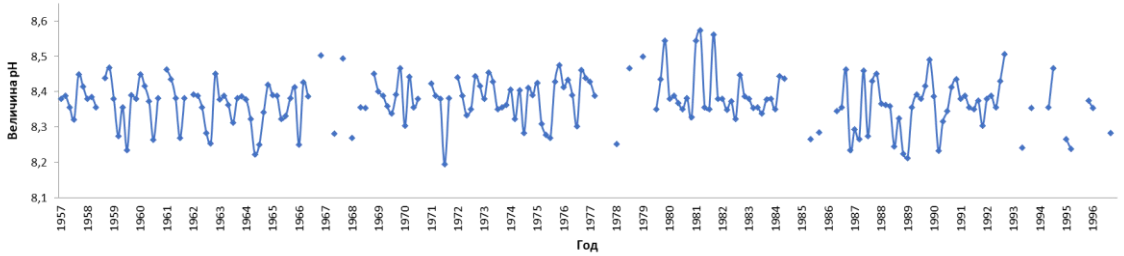


Рис. 3. Временной ход величины pH поверхностного слоя вод глубоководной части Черного моря за период с 1957 по 1996 гг. Величина pH усреднялась по двухмесячным отрезкам
Fig. 3. Time course of the pH value of the surface layer of the waters of the deep part of the Black Sea for the period from 1957 to 1996. The pH value was averaged over 2-month intervals

На графике (рис. 3) видны отсутствующие средние за два последовательных месяца текущие значения pH, обозначенные пропусками во временном ходе. Их общее количество за анализируемый период – 46 точек. Временная интерполяция этих значений pH выполнялась следующим образом. Искомые величины восстанавливались с учетом внутригодового хода величины pH в открытой части Черного моря. Сезонный ход величины pH, представленный суммой двух гармоник (годовой и полугодовой), описывает более 85% общей дисперсии ряда. Размах осредненной сезонной изменчивости величины pH в поверхностном слое достигает 0,05 и характеризуется двумя максимумами: весенним и осенним, которые достигаются в марте и октябре, а также летним минимумом (рис. 4).

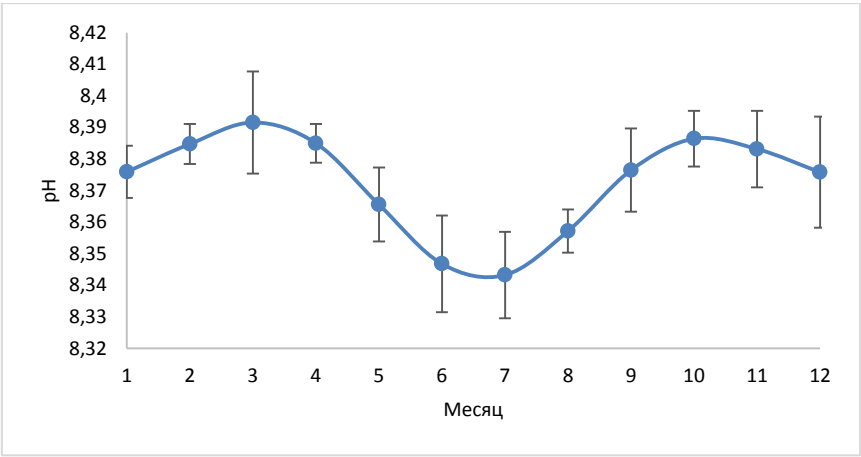
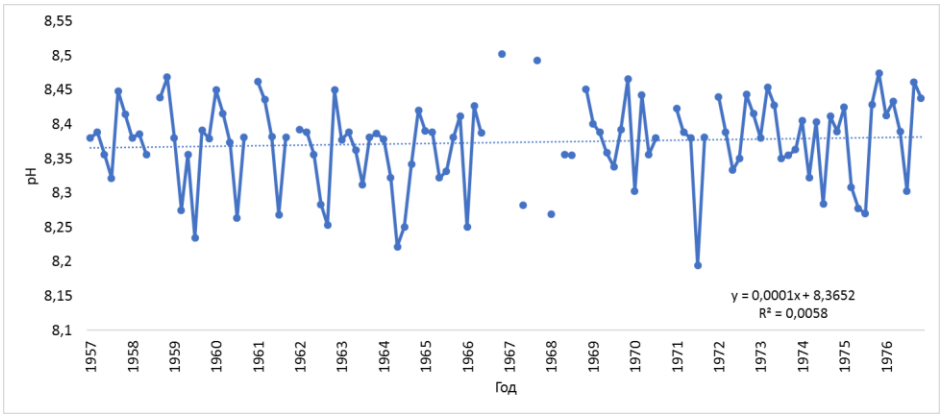


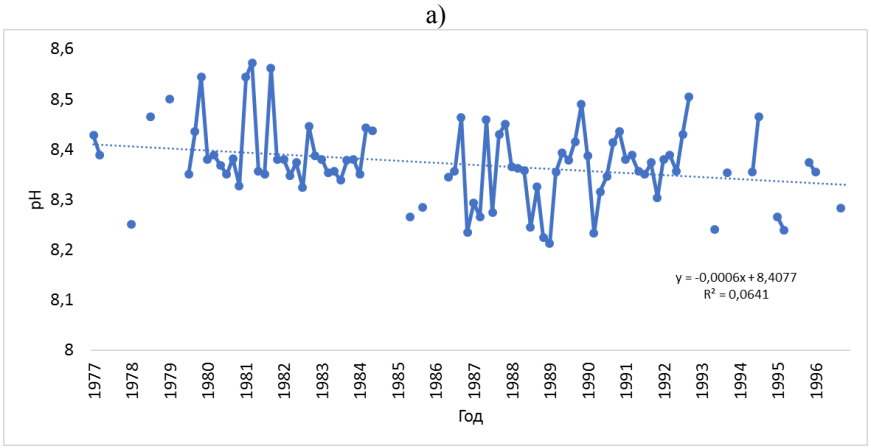
Рис. 4. Сезонный ход величины pH поверхностного слоя вод глубоководной части Черного моря. Вертикальные отрезки – среднеквадратическое отклонение среднемесячной величины pH [7]
Fig. 4. Seasonal variation of the pH value value of the surface layer of the waters of the deep part of the Black Sea. Vertical segments – the standard deviation of the average monthly pH value [7]

Далее каждое восполненное значение pH подлежало корректировки на угол наклона линии тренда. На основании выполненных ранее исследований получено, что временной ряд pH поверхностного слоя Черного моря за период с 1957 по 1996 гг. делится на два отрезка с принципиально различным качеством данных по pH. Первый период продолжался с 1957 по 1976 гг., второй – начиная с 1977 и по 1996 гг. [8].

Частично, наличие двух разных временных отрезков обусловлены методикой определения величины pH в Черном море. Примерно до середины 1970-х годов величина pH определялась в основном колориметрическим методом. Этот метод основан на изменении окраски индикатора, добавленного к исследуемому раствору, в зависимости от величины pH. Точность определения pH таким методом 0,1 [13]. В последующие годы стал широко использоваться потенциометрический метод, который намного точнее. Такой метод основан на измерении ЭДС системы, состоящей из индикаторного электрода и электрода сравнения. Точность определения pH на порядок выше, т. е. pH определялся до второго знака после запятой [13]. На рис. 5 показаны временные реализации pH для этих двух периодов с линейными трендами. Отметим, что линейный тренд, выделенный по данным о величине pH с 1957 по 1976 гг., незначим.



а)



б)

Рис. 5. Графики временного хода величины pH и уравнение линейного тренда, где x – временной шаг (0,167 года) за период 1957–1976 гг. (а) и 1977–1996 гг. (б)

Fig. 5. Graphs of the time course of the pH value and the linear trend equation, where x is the time step (0.167 years) for the period 1957-1976 (a) and 1977-1996 (b)

Согласно уравнениям линейных трендов, данные первого и второго временных отрезков были скорректированы на соответствующие величины. На рис. 6 представлен полученный ряд.

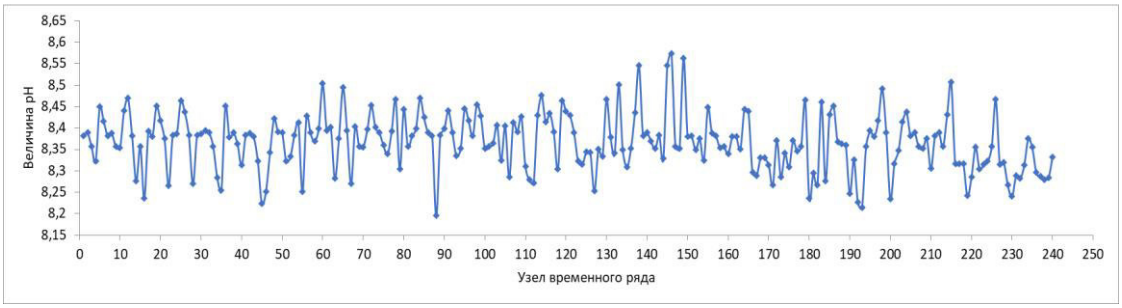


Рис. 6. График временного ряда величины pH с 1957 по 1996 гг. с проинтерполированными с учетом сезонного хода величинами и скорректированными на углы наклона трендов для двух периодов

Fig. 6. Graph of the time series of the pH value from 1957 to 1996. with seasonally interpolated values and corrected for trend slopes for two periods

Следующим этапом для выравнивания ряда по дисперсии была добавка к проинтерполированным значениям белого шума. Производилась эта процедура следующим образом:

– для двух временных отрезков вычислялось среднеквадратическое отклонение (σ). Оказалось, что для первого временного отрезка $\sigma_1 = 0{,}0598$, для второго временного $\sigma_2 = 0{,}0699$;

– к каждому проинтерполированному значению внутри первого и второго временных отрезков с помощью генератора случайных чисел либо прибавлялась, либо вычиталась независимая случайная величина. Среднеквадратичное отклонение этих добавок (σ) соответствовало первому или второму из приведенных выше величин в зависимости от того, в каком из временных отрезков находилось восстанавливаемое значение (рис. 7).

Таким образом, формула проинтерполированных значений имеет вид:

$$\mathrm{pH}_i = \mathrm{pH}_{i,j}\alpha_{1,2} \pm r_{1,2}, \qquad (1)$$

где $\mathrm{pH}_{i,j}$ – среднемесячное значение с учетом сезонного хода (рис. 1); $\alpha_{1,2}$ – коэффициент, учитывающий угол наклона линии тренда для первого (1) или второго временного отрезков (2); $r_{1,2}$ – независимая случайная величина, представляющая собой некоррелированный белый шум со среднеквадритическими отклонениями для двух временных отрезков, приведенными выше.

Временной ряд pH. После добавления белого шума среднеквадратическое отклонение первого ряда составило 0,0596, второго 0,0700.

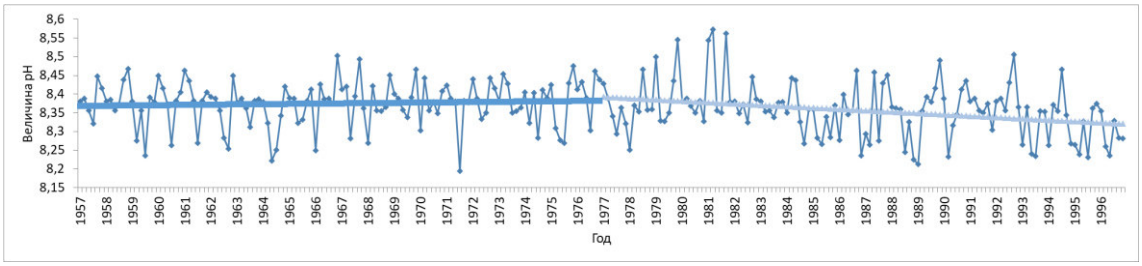


Рис. 7. Временной ряд и линейные тренды величины pH поверхностного слоя вод глубоководной части Черного моря за период с 1957 по 1996 гг. с проинтерполированными значениями согласно формуле (1)

Fig. 7. Time series and linear trends in the pH value of the surface layer of waters in the deep part of the Black Sea for the period from 1957 to 1996 with interpolated values according to formula (1)

На рис. 7 показан временной ряд pH с графиками линейных трендов для двух временных отрезков. Первый период характеризуется положительным (незначимым) трендом. С 1957 по 1976 гг. величина pH возрастала со скоростью 0,006 ед. pH за 10 лет. С 1977 до 1996 гг. происходит монотонное (и значимое) понижение pH со скоростью около 0,03 ед. pH за 10 лет.

Так как шум мы генерировали для двух отрезков с разной дисперсией, то и проверку на стационарность проводим по двум отрезкам отдельно. Из полученного временного ряда удален линейный тренд для каждого из двух отрезков отдельно (рис. 8). Затем ряды проверялись на стационарность методом проверки гипотезы о постоянстве дисперсии временного ряда при разбиении каждого из двух исходных интервалов на три равные части. Этот метод использует двухсторонний критерий Фишера [14]. При сравнении дисперсий двух независимых выборок из каждой генеральной совокупности гипотеза о постоянстве дисперсии подтверждается – ряды стационарны. Дисперсии по двум временным рядам показаны в табл. 1. В том числе, различие дисперсий двух временных отрезков, согласно двустороннему критерию Фишера статистически незначимо. Получено, что эмпирическое значение критерия $F_{эмп}$ (1,36) не превышает $F_{крит}$ (1,43) при уровне значимости 0,05.

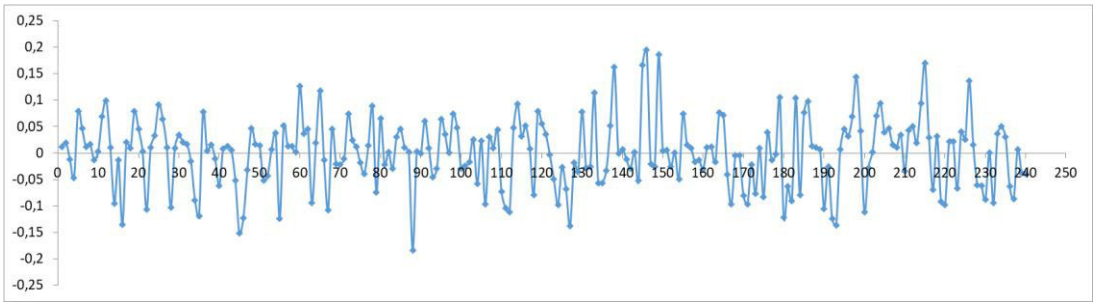


Рис. 8. График квазистационарного временного ряда величины pH с 1957 по 1996 гг.
Fig. 8. Graph of the quasi-stationary time series of the pH value from 1957 to 1996

Таблица 1. Дисперсии стационарного временного ряда при разбиении исходных интервалов на три равные части

	Временной ряд с 1957 по 1976 гг.	Временной ряд с 1977 по 1996 гг.
	Дисперсия	
Первая часть ряда	0,0034	0,0049
Вторая часть ряда	0,0038	0,0050
Третья часть ряда	0,0035	0,0045
Дисперсия всей части ряда	0,0035	0,0049
Среднеквадратическое отклонение всей части ряда	0,0596	0,0700

Определение преобладающих периодов межгодовых колебаний величины pH выполнялось методом спектрального анализа (рис. 9) [15]. Так как цель этого анализа – получение межгодовых низкочастотных колебаний, то ряд был предварительно преобразован, а именно: для подавления шумов и фильтрации высокоамплитудных сезонных вариаций к временному ряду применен треугольный 9-точечный фильтр. Далее выполнялось прямое разложение полученной реализации в ряд Фурье. Для получения спектральных оценок проводилось сглаживание периодограммы по трем частотам с использованием треугольного фильтра.

В результате во временном ходе величины pH с 1957 по 1996 гг. выделена значимая (на уровне 80%-го доверительного интервала) квазипериодическая компонента с периодом 10 лет (рис. 9). Квазидвухлетняя цикличность, описанная в работе [8], по нашим данным не выделяется.

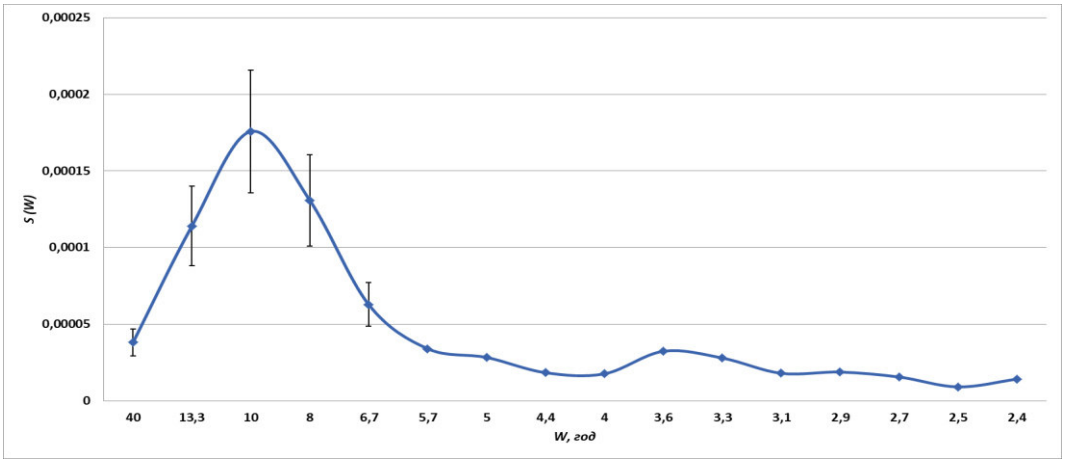


Рис. 9. Спектр временного ряда pH за период с 1957 по 1996 гг. Вертикальные отрезки – 80% доверительный интервал, рассчитанный по критерию Стьюдента
Fig. 9. Spectral composition of the pH time series for the period from 1957 to 1996. Vertical bars – 80% confidence interval calculated by Student's t-test

Заключение. По результатам работы сформирован эквидистантный временной ряд величины pH для глубоководной части Черного моря за период с 1957 по 1996 гг., разрешающий годовой ход. Благодаря разработанной методике интерполяции воссозданы отсутствующие значения pH.

По статистической структуре временной ряд делится на два временных отрезка, различных по знаку тенденции и дисперсии величины pH. Первый продолжается с 1957 по 1976 гг., а второй с 1977 по 1996 гг. СКО pH для первого отрезка составляет 0,0598, второго – 0,0699. Эти различия дисперсий незначимо на 95% уровне. Первый временной отрезок характеризуется положительной (хотя и незначимой) тенденцией изменений величины pH. С 1957 по 1976 гг. величина pH возрастала со скоростью 0,006 ед. pH за 10 лет. Второй временной отрезок характеризуется отрицательным линейным трендом. С 1977 до 1996 гг. величина pH снижалась со скоростью около 0,03 ед. pH за 10 лет. С помощью добавления белого шума к проинтерполированным значениям получен стационарный по дисперсии временной ряд величины pH. При этом среднеквадратическое отклонение внутри каждого временного отрезка практически не изменилось.

В результате спектрального анализа полученного эквидистантного временного ряда величины pH выделена значимая квазипериодическая составляющая изменчивости с периодом 10 лет.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИПТС «Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов», № госрегистрации 121122300074-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kroeker K.J., Kordas R.L., Crim R., Hendriks I.E., Ramajo L., Singh G.S., Duarte C.M., Gattuso J.P.* Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming // Global change biology. 2013. Vol.19. Iss. 6. P. 1884-1896. https://doi.org/10.1111/gcb.12179

2. *Doney S.C., Balch W.M., Fabry V.J., Feely R.A.* Ocean Acidification: A critical emerging problem for the ocean sciences // Oceanography. 2009. Vol. 22. P. 16–25.

3. *Lauvset1 S.K., Gruber N., Landschützer P., Olsen1 A., Tjiputra J.* Trends and drivers in global surface ocean pH over the past 3 decades // Biogeosciences. 2015. Vol. 12. P. 1285–1298. DOI:10.5194/bg-12-1285-1298

4. *Lauvset S.K., Gruber N.* Long-term trends in surface ocean pH in the North Atlantic // Marine Chemistry. 2014. Vol. 162. P. 71–76.

5. *Leseurre C., Monaco Cl. Lo, Reverdin G., Metzl N., Fin J., Olafsdottir S., Racapé V.* Ocean carbonate system variability in the North Atlantic Subpolar surface water (1993–2017) // Biogeosciences. 2020. Vol. 17. P. 2553–2577.

6. *Polonsky A.B.* pH variability in the Black Sea waters in the 20th century: is the acidity of sea water increasing? // Reports of the National Academy of sciences of Ukraine. 2012. № 2. P. 146–149.

7. *Полонский А.Б., Гребнева Е.А.* Пространственно-временная изменчивость водородного показателя вод Черного моря // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 4. С. 494–499.

8. *Гребнева Е.А.* Разработка эмпирической модели долговременного изменения pH поверхностных вод глубоководной части Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 4 (46). С. 22–30. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-22-30

9. *Elge M.* Acidification Analysis of Black Sea // International Journal of Environment and Geoinformatics (IJEGEO). 2021. Vol. 8 (4). P. 467–474. DOI: 10.30897/ijegeo. 857893

10. *Мельников В.В., Полонский А.Б., Котолупова А.А. и др.* GIS Института природно-технических систем // Системы контроля окружающей среды. 2016. № 4 (24). С. 49–55.

11. *Новикова А.М., Каширина Е.С., Новиков А.А., Полонский А.Б., Панкеева Т.В.* ГИС в морских исследованиях: мировой опыт и возможности его применения на примере Черноморского региона // Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2017. № 1 (3). С. 54–66.

12. *Построение* моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): учебное пособие / К.А. Мальцев, С.С. Мухарамова. Казань: Казанский университет, 2014. 103 с.

13. *Васильев В.П.* Аналитическая химия. В 2 кн. Кн. 2. Физико-химические методы анализа: учеб. для студ. Вузов, обучающихся по химико-технол. спец. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Дрофа, 2002. 384 с.

14. *Кремер Н.Ш., Путко Б.А.* Эконометрика: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. 328 с.

15. *Зорич В.А.* Математический анализ. М.: Физматлит, 1984. 544 с.

INTERANNUAL VARIABILITY OF THE pH VALUE IN THE SURFACE LAYER OF THE DEEP-WATER PART OF THE BLACK SEA

A.B. Polonsky, E.A. Grebneva

Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28

As a result of spatio-temporal interpolation of archival data on the pH value in the surface water layer of the deep-water part of the Black Sea, an equidistant time series is formed for the period from 1957 to 1996. with a two-month average. The previously obtained result is confirmed that, according to the statistical structure, the time series is divided into two 20-year time intervals, different in the sign of long-term trends and the coefficient of variation. The first of them begins in 1957 and ends in 1976, the second one takes the next 20 years (from 1977 to 1996). After removing the linear trend, spatio-temporal interpolation considering the annual cycle, and adding white noise to the missing values, a stationary pH time se-

ries is obtained. As a result of the spectral analysis, a significant (at the 80% confidence level) quasi-periodic component of the variability of the pH value of the surface layer of the open part of the Black Sea with a period of 10 years is identified.
Keywords. Black Sea, deep water, surface layer, pH value, stationary time series, annual cycle, interpolation, interannual variability.

REFERENCES

1. *Kroeker K.J., Kordas R.L., Crim R., Hendriks I.E., Ramajo L., Singh G.S., Duarte C.M. and Gattuso J.P.* Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global change biology,* 2013, Vol. 19, Iss. 6, pp. 1884–1896. https://doi.org/10.1111/gcb.12179
2. *Doney S.C., Balch W.M., Fabry V.J., and Feely R.A.* Ocean Acidification: A critical emerging problem for the ocean sciences. *Oceanography,* 2009, Vol. 22, pp. 16–25. https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.93
3. *Lauvset S.K., Gruber N., Landschützer P., Olsen A., and Tjiputra J.* Trends and drivers in global surface ocean pH over the past 3 decades. *Biogeosciences,* 2015, Vol. 12, pp. 1285–1298. doi:10.5194/bg-12-1285-2015
4. *Lauvset S.K. and Gruber N.* Long-term trends in surface ocean pH in the North Atlantic. *Marine Chemistry,* 2014, Vol. 162, pp. 71–76.
5. *Leseurre C., Monaco Cl. Lo, Reverdin G., Metzl N., Fin J., Olafsdottir S., and Racapé V.* Ocean carbonate system variability in the North Atlantic Subpolar surface water (1993–2017). *Biogeosciences*, 2020, Vol. 17, pp. 2553–2577.
6. *Polonsky A.B.* pH variability in the Black Sea waters in the 20th century: is the acidity of sea water increasing? *Reports of the National Academy of sciences of Ukraine,* 2012, No. 2, pp. 146–149.
7. *Polonskiy A.B. and Grebneva E.A.* Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' vodorodnogo pokazatelya vod Chernogo moray (Spatial-temporal variability of the pH value of the Black Moray waters). *Doklady Akademii nauk,* 2019, Vol. 486, No. 4, pp. 494–499.
8. *Grebneva E.A.* Razrabotka empiricheskoy modeli dolgovremennogo izmeneniya pH poverkhnostnykh vod glubokovodnoy chasti Chernogo moray (Development of an empirical model of long-term changes in the pH of surface waters in the deep-water part of the Black Sea). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2021, No. 4 (46), pp. 22–30. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-22-30
9. *Elge M.* Acidification Analysis of Black Sea. *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJEGEO),* 2021, Vol. 8 (4), pp. 467–474. DOI: 10.30897/ijegeo. 857893
10. *Mel'nikov V.V., Polonskiy A.B., Kotolupova A.A., Grebneva E.A., Mel'nik L.A., and Biryukova M.A.* GIS Instituta prirodno-tekhnicheskikh system (GIS of the Institute of Natural and Technical Systems). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2016, No. 4 (24), pp. 49–55.
11. *Novikova A.M., Kashirina Ye.C., Novikov A.A., Polonskiy A.B., and Pankeyeva T.V.* GIS v morskikh issledovaniyakh: mirovoy opyt i vozmozhnosti yego primeneniya na primere Chernomorskogo regiona (GIS in marine research: world experience and possibilities of its application on the example of the Black Sea region). *Trudy Karadagskoy nauchnoy stantsii im. T.I. Vyazemskogo – prirodnogo zapovednika RAN,* 2017, No. 1 (3), pp. 54–66.
12. *Mal'tsev K.A. and Mukharamova S.S.* Postroyeniye modeley prostranstvennykh chisel (s ispol'zovaniyem paketa Surfer) (Building models of spatial variables (using the Surfer package), Kazan': Kazanskiy universitet, 2014, 103 p.
13. *Vasil'yev V.P.* Analiticheskaya khimiya (Analytical chemistry), Moscow: Drofa, 2002, 384 p.
14. *Kremer N.Sh. and Putko B.A.* Ekonometrika (Econometrics), Moscow: Unity-dana, 2010, 328 p.
15. *Zorich V.A.* Matematicheskiy analiz (Mathematical analysis), Moscow: Fizmatlit, 1984, 544 p.

УДК 574.5+561.26:477.75(556.5)+004.65 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-22-30

ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ БАЗА ДАННЫХ О ДИАТОМОВЫХ МИКРОВОДОРОСЛЯХ ВОДОЕМОВ КРЫМА

А.М. Лях[1], И.В. Агаркова-Лях[2]

[1] ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН»,
РФ, г. Севастополь, пр-т Нахимова, 2
E-mail: me@antonlyakh.ru
[2] Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: iva_crimea@mail.ru

Описаны информационные модули базы для хранения таксономических, географических, экологических и других данных о диатомовых водорослях внутренних водоемов и водотоков Крымского п-ова. Структура базы является универсальной и позволяет хранить комплексные эколого-географические сведения о любых группах организмов любого региона**.** Информация для базы извлечена из публикации Л. Н. Бухтияровой (1999 г.) и систематизирована авторами. Виртуальная система для дистанционного доступа к базе данных расположена по адресу: *3d-microalgae.org/diatoms/of/crimea*.

Ключевые слова: биологическая база данных, таксономическая информационная система, географический объект, диатомовые микроводоросли, таксономический состав, Крым, водоемы, водотоки

Поступила в редакцию: 24.05.2022.

Введение. Диатомовые микроскопические одноклеточные водоросли встречаются повсеместно, где есть вода. Они занимают важную нишу в водных экосистемах и обычно доминируют по численности или биомассе. Диатомовые чутко реагируют на параметры окружающей среды. Как отмечено в работе [1, с. 90] сообщества диатомовых «любых местообитаний интегрально отражают их экологические условия». По этой причине, они служат индикаторами состояния водных объектов, в том числе, изменений в водоемах, происходящих под влиянием глобальных климатических факторов [2].

Некоторые индексы для оценки качества вод учитывают видовой состав диатомовых микроводорослей [3, 4] и аномальные морфологические изменения кремниевых структур их панцирей [5, 6]. В связи с этим, важно иметь общедоступные сведения о видах диатомовых, населяющих водоемы определенной территории: диапазонах морфологической изменчивости (морфологической пластичности), вариабельности иных метрических и неметрических признаков.

Комплексную базу с подобными данными формируют поэтапно. На первом этапе собирают список видов и наполняют библиотеку изображениями представителей видов, населяющих некоторый район. В качестве источника такой информации часто используют натурные наблюдения и материалы публикаций.

Сведения о диатомовых водорослях рек, озер, ручьев, прудов и водохранилищ Крыма крайне малочисленны. До настоящего времени единственной обобщающей работой со списком диатомовых региона является монография Л. Н. Бухтияровой, изданная в 1999 г. [7]. В монографиях [8, 9], посвященных диатомовым территории России, Крым не упомянут.

К сожалению, в отмеченной выше монографии [7], найденные в Крыму виды не выделены в отдельный блок. Вместо этого, автор перечислил все обнаруженные во внутренних водоемах Украины виды в алфавитном порядке, указы-

вая для каждого из них район и предпочитаемые экологические условия (рис. 1). При такой подаче материала возникают трудности с извлечением информации о видах крымских диатомовых. Таким образом, основным недостатком работы [7] является отсутствие систематизации данных по региональному признаку.

101. **Diatoma hiemale** (Roth) Heib. (Heiberg, 1863: 58).
Basionym *Conferva hyemalis* Roth (Roth, 1800: 205); *Fragilaria hiemale* (Roth) Lyngb. (Lyngbye, 1819: 185); *F. striata* Ehr. (Ehrenberg, 1831: 63); *Odontidium hyemale* Kütz. (Kützing, 1844: 44, tab. 17, fig. 4).
Ecology: **Sa – fo pH – i S – x B – FL G – a.**
Distribution: **TCR:** b, rm Tisa [80]. **CF:** b, ru Tisa [80]. **FCF:** rm Prut, rr [80]. **WUF:** b [111]. **WFS:** b [111]. **RBCMS:** pd [111]; **MC:** wf Massandrovskiy, sp Krech (611/101), sp Parilya (745/24), sp Uluhklu-Chokrack, pd [2].

102. **Diatoma mesodon** (Ehr.) Kütz. (Kützing, 1844: 47, tab. 17, fig. 13).
Basionym *Fragilaria mesodon* Ehr. (Ehrenberg, 1838: 57, tab. 2, 1, fig. 9); *Odontidium mesodon* Kütz. (Kützing, 1844: 44, tab. 17, fig. 1); *Diatoma hiemale* (Roth.) Heib. var. *mesodon* (Ehr.) Grun. in V.H. (Van Heurck, 1881: 160, tab. 51, fig. 3–4);
** *Diatoma hiemale* (Lyngb.) Heib. var. *mesodon* (Kütz.) Grun. in V.H.
Ecology: **Sa – fo pH – cn S – o B – FL G – a.**
Distribution: rr Dnieper [111]. **WFS:** b [111]. **TCR:** b, rm Tisa [80]. **CF:** b, ru Tisa, ru Prut [80]. **FCF:** rm Prut, rr [80]. **CFS:** rr Alma [2]. **MC:** rr Alma, rr Uchan-Su, rr, wf Yauzlar, wf Uchan-Su, wf Massandrovskiy, sp Massyreis, sp Vysotny, sp, Krech (736), st, rv, eb [2]. **CSB:** rr Khastabash, rr Ulu-Uzen, st [2].

Рис. 1. Фрагмент списка таксонов диатомовых микроводорослей из работы [7].
Для видов указаны коды экологических параметров и районов обитания; районы Крыма отмечены как: MC – горы, CFS – предгорье, CSB – южный берег
Fig. 1. The fragment of the list of diatom microalgae published in [7].
Codes of ecological parameters and codes of the regions are followed each species; Crimean regions marked as: MC – mountains, CFS – foothills, CSB – south coast

Тем не менее, и по прошествии 15–20 лет, следует констатировать отсутствие обобщающих работ по диатомовым водорослям (например [8, 9]), в которых содержательная часть сочетается с удобной для работы формой подачи материала, позволяющей быстро сориентироваться и найти нужный вид, и получить о нем исчерпывающую научную информацию.

Одной из возможных причин этого является нежелание или невозможность исследователей использовать существующие программные инструменты для хранения накопленных данных вследствие ряда обстоятельств: недостатка знаний в области информационных технологий, необходимости дополнительного обучения и изучения программных средств, опасности потери доступа к данным, языкового барьера. Это подводит нас к актуальности разработки отечественной таксономической информационной системы для хранения комплекса разнородных данных о живых организмах, в том числе о диатомовых микроводорослях.

Цель работы заключается в описании структуры базы данных, предназначенной для хранения таксономических, географических и экологических сведений о микроскопических водорослях.

При разработке базы возникают задачи о структурированном представлении и хранении:

– дерева таксонов,
– географических данных,
– экологических параметров,
– литературных источников,
– характеристик организмов,

и задача о связывании этих данных в единое целое.

Объектом для проверки работоспособности базы данных выбраны виды диатомовых микроводорослей водоемов Крыма.

Материалы и методы. Для проектирования базы данных использован модульный подход, при котором база строится из отдельных структурно независимых информационных модулей, связанных друг с другом при помощи вспомогательных таблиц. Основой для построения базы послужили опубликованные структуры информационных модулей

[10–12], а также результаты логического анализа и синтеза доступной информации. Данные для наполнения базы извлечены из монографии [7].

В процессе проектирования базы мы стремились сделать ее структуру достаточно универсальной, чтобы в дальнейшем в базу можно было заносить новые сведения о находках диатомовых микроводорослей и разнообразных характеристиках отдельных организмов.

Полученные результаты. В опубликованной работе [7] данные о диатомовых микроводорослях представлены в трех блоках: таксономическом, экологическом и географическом (Рис. 1).

Таксономический блок содержит порядковый номер, видовое название, ссылки на опубликованные иллюстрации, синонимичные названия и ссылки на работы, где они упоминаются. Из этих сведений мы берем только название вида и его порядковый номер, так как прочую номенклатурную информацию можно извлечь из специализированных баз данных [13]. Из них для работы мы используем «Альгабейз» [14].

Экологический блок содержит закодированные значения параметров среды, которые считаются оптимальными для существования видов.

Географический блок включает закодированные обозначения географических районов, названия водоемов или локальные названия мест нахождения водоемов, сведения об участках водоемов, где были собраны пробы, и ссылки на литературные источники.

Следуя опубликованной структуре представления информации, рассмотрим информационные модули для хранения данных, проанализируем связи между ними и опишем структуру ключевого модуля, объединяющего все данные.

Модуль источников данных. Источники данных – это ссылки на информационные объекты, из которых были получены определенные сведения. Они делятся на два типа: опубликованные работы и неопубликованные результаты исследований.

В представленной версии базы данных нам не важен способ описания источников данных. Главное – чтобы каждому источнику данных был сопоставлен уникальный идентификатор. Это позволяет вынести источники данных в отдельный модуль и взаимодействовать с ним при помощи идентификаторов.

Таксономический модуль хранит дерево научных названий таксонов. Его структура подробно описана в [10] и в настоящей базе данных используется без изменений. Кратко напомним, что все дерево таксонов вместе с валидными, синонимичными и невалидными названиями содержит таблица таксонов.

Любой таксон характеризуется названием, которое служит тегом для доступа ко всей совокупности информации, накопленной об организмах, относящихся к данному таксону. По этой причине таблица таксонов хранит только названия таксонов, тогда как прочие сведения содержат вспомогательные таблицы.

Названия диатомовых водорослей, сохраненные в таксономической таблице, приведены так же, как в оригинальной публикации [7]. Однако если опубликованное видовое название в настоящее время не признается действующим, то в таблицу мы также записываем валидное название вида в соответствии со сведениями из «Альгабейз» [14]. В этом случае запись таксономической таблицы с недействующим видовым названием хранит ссылку на идентификатор записи с валидным названием вида. Это позволяет объединить невалидное и валидное названия и проследить цепочку изменений видовых названий.

Географический модуль содержит названия и иерархию географических объектов. Структура модуля описана в работах [11, 12]. Напомним, что корнем географического дерева является вся поверхность Земли. Следующий по рангу уровень разделен на две ветви: *сушу* – сухопутные территории, и *воды* – морские и океанические акватории.

Так как мы рассматриваем только внутренние водоемы Крыма, то на следующем уровне находится территория Крымского п-ова. Поскольку территория Крыма включает наземные и водные

объекты, последним присвоен специальный флаг «*is_aquatory»,* который показывает, что этот водоем находится на суше [12]. Этот флаг зарезервирован для случаев, когда в базе данных будут храниться сведения об обитателях суши, например, пауках. Тогда флаг позволит разделить записи о сухопутных и водных организмах, найденных в одном географическом районе.

Как и в случае с таксономическими, географические названия приведены так, как они даны в первоисточнике [7]. Однако если географический объект был переименован, мы сохраняем его современное название и связываем эти названия друг с другом.

Любую достаточно крупную территорию можно разделить на участки по ряду признаков (районировать). Так, территорию Крыма можно разделить по физико- и экономико-географическим признакам [15–17]. Для наших целей территория Крыма разделена по бассейнам крупных рек и акваториям озер и водохранилищ [18, 19], в которых далее выделены более мелкие объекты: родники, ручьи, притоки, пруды, водопады.

Очевидно, что границы районов, выделенные по природным признакам, не всегда будут совпадать. В этом случае таблица хранит альтернативные способы районирования, в частности, по административно-территориальному делению.

Место находки. Географический модуль также содержит таблицу с пространственно-временным положением мест находок организмов. Это синоним *локации,* описанной в [12], который представляет собой географическую точку, заданную в виде координат или при помощи ориентиров. Место находки вместе с названием географической территории или акватории позволяет однозначно определить местоположение обнаруженных организмов.

Модуль экологических параметров. Значения экологических параметров характеризуют условия обитания вида.

В монографии [7] для характеристики диатомовых микроводорослей используется пять разновидностей параметров. Поскольку экологию организмов можно описать с помощью большего числа характеристик, возникает задача оптимального хранения обширного множества значений в базе данных. Возможны три варианта хранения данных: в виде дуплета, ассоциативного массива или отдельных полей.

В первом случае запись таблицы состоит из пары (идентификатор и значение параметра). То есть, каждому значению соответствует отдельная запись. Следовательно, для добавления нового значения необходимо добавить новую запись. По нашему опыту, это – наиболее неудобный вариант хранения данных, так как просмотр значений всех параметров, относящихся к виду, возможен только путем последовательного просмотра записей.

Во втором случае запись хранит текстовое поле, в котором перечислены значения всех параметров в виде ассоциативного массива. Например, это может быть текстовое поле в формате Джейсон (JSON). Тогда одна запись хранит набор значений нескольких параметров, причем параметры могут многократно повторяться. Для добавления нового значения параметра необходимо дописать слова к сохраненному тексту. Такой способ хранения компактен, но не оптимален для поиска, так как для отбора параметров используется относительно медленный полнотекстовый поиск.

В третьем случае каждому параметру сопоставлено отдельное поле. Тогда запись таблицы соответствует некоторому набору значений параметров, которые не дублируются. Следовательно, сопоставления с видом несколько значений одного параметра, в таблицу придется добавить столько записей, сколько значений параметра использовано. Формат данных допускает добавление новых параметров, для чего следует добавить в таблицу новые поля. Этот вариант оптимален для поиска и выбора параметров, но не рационален с точки зрения использования памяти.

Для работы мы используем более разумную модификацию предыдущего способа. В ней поле, соответствующее параметру, может хранить несколько его

значений. По типу значений любые параметры делят на качественные и количественные; последние – на дискретные и непрерывные. Тип и краткая характеристика параметров перечислены в другой таблице. Третья таблица содержит допустимые значения качественных и диапазоны варьирования количественных параметров. Значения из этой таблицы также используют для проверки данных.

Модуль с данными об отдельных микроводорослях служит для хранения разнообразных сведений о представителях диатомовых водорослей. Таблицы модуля содержат фотографии, молекулярно-генетические, морфологические, морфометрические и прочие данные об организмах. Модуль включает несколько таблиц, связанных между собой при помощи уникального идентификатора организма.

Связующий модуль объединяет данные из всех модулей в одно целое. Чтобы сформировать его структуру, проанализируем связи между объектами.

Виртуальная и реальная особь. Регистрация любого вида на определенной территории означает, что мы нашли там хотя бы одну особь этого вида. Затем определили эту особь (отнесли ее к данному виду), описали ее особенности (получили набор значений каких-либо характеристик особи) и сохранили эти сведения в каком-либо виде (сформировали источник данных). Таким образом мы сопоставили пространственно-временному событию (находке вида) данные о конкретном экземпляре организма определенного вида. То есть связали друг с другом сведения об организме, экземпляр организма, видовое название, место и дату находки и источник данных.

Однако, когда мы описываем опубликованные данные о наличии вида на определенной территории, как в работе [7], то часто не можем ничего сказать о характеристиках отдельных особей. В этом случае будем считать, что виду соответствует *виртуальная особь* без каких-либо характеристик [11].

Находка представителей вида является зафиксированным фактом, подтвержденным соответствующими данными: фотографиями, результатами молекулярно-генетического анализа, коллекционными образцами. Эти данные могут быть как опубликованными, что придает большую значимость находке, так и нет. Иными словами, находке любого вида можно сопоставить некоторый источник данных. Также виду соответствует реальная или виртуальная особь. Таким образом, серия, состоящая из идентификаторов особи, вида и места находки, даты находки и литературного источника, является подтверждением находки вида на указанной территории.

Экологические характеристики местообитания вида характеризуют условия среды, благоприятные для жизнедеятельности особей вида. Чтобы указать такие условия, необходимо каждой записи таблицы со значениями экологических параметров сопоставить идентификатор особи, найденной в этих условиях, либо вида, если про особей ничего не известно. Так как данные об экологии вида являются результатами исследований, то к этим записям необходимо добавить ссылки на источники данных. Таким образом, здесь, как и в случае с находкой таксона, фигурирует серия атрибутов: идентификаторы особи и вида, значения благоприятных для вида экологических параметров, ссылка на источник данных.

Экологические характеристики географического объекта описывают условия среды в некоторой географической точке в указанное время. Для сохранения этих характеристик необходимо сопоставить запись со значениями экологических параметров с идентификатором места находки, датой, когда были произведены измерения, и ссылкой на источник данных.

Цепочки связей. Проведенный анализ выявил следующие цепочки связей между информационными объектами:

А. Находка вида: {особь, вид, место, дата, источник данных};

Б. Экология вида: {особь, вид, экол. усл., источник данных};

В. Условия среды: {экол. усл., место, дата, источник данных}.

Когда особь реальная, цепочки хранят ее идентификатор, позволяющий получить ее характеристики. Если же особь виртуальная, ее идентификатор является пустым.

Для корректного выполнения комплексных научных исследований, одновременно с находкой организма (отбором пробы) фиксируют параметры окружающей среды. Поэтому три упомянутые цепочки образуют одну: {особь, вид, место, дата, экол. условия, источник данных}. К сожалению, такие комплексные исследования проводят редко. Намного чаще при находке организмов условия среды оценивают постфактум по опубликованным данным. В обобщающих таксономических сводках поступают еще проще – приводят интегральные экологические характеристики вида и упоминают районы обитания, причем одни не связывают с другими, как это сделано в [7] (рис. 1). Поэтому вместо единой цепочки связей нам достаются ее фрагменты.

Для того, чтобы сохранить неполную информацию в базе данных мы предлагаем сохранять фрагменты информации в одной записи, оставляя пропуски на месте отсутствующих данных. Число таких записей будет равно числу фрагментов. Для этих записей выделим отдельную таблицу.

Опишем таким способом сведения о виде *Diatoma mesodon,* найденном на территории Крыма (рис. 1). Используем структуру следующего формата:

× *Название вида* – (место находки) – {значения экологических параметров} – ‘дата находки’ – [источник данных],

в которой × означает, что данные о реальной особи отсутствуют.

Подробная информация о местах и времени крымских находок *D. mesodon* приведена в диссертации Л. Н. Бухтияровой [20]. Но по причине отсутствия ее полного варианта, в качестве даты находки укажем год ее публикации – 1992. Получим следующую последовательность записей (показаны не все записи):

× *Diatoma mesodon* – (·) – {Sa:fo, pH:cn, S:o, B:FL, G:a} – ‘1999’ – [Bukhtiyarova, 1999]

× *Diatoma mesodon* – (Крым: предгорье: река Альма) – {·} – ‘1992’ – [Бухтиярова, 1992]

× *Diatoma mesodon* – (Крым: горы: река Учан-Су) – {·} – ‘1992’ – [Бухтиярова, 1992]

× *Diatoma mesodon* – (Крым: горы: водопад Яузлар) – {·} – ‘1992’ – [Бухтиярова, 1992]

× *Diatoma mesodon* – (Крым: южный берег: река Улу-Узень) – {·} – ‘1992’ – [Бухтиярова, 1992]

Первая запись содержит значения экологических параметров, которые не привязаны ни к каким районам, а извлечены из работы [7]. Остальные – перечисляют места находок вида.

Таблица с подобными записями объединяет все модули базы данных в одно целое, то есть является центральным связующим модулем.

Таксономическая информационная система, обеспечивающая доступ к базе данных, расположена по адресу:

3d-microalgae.org/diatoms/of/crimea

Заключение. Разработанная структура базы данных позволяет хранить комплексные эколого-географические сведения о различных группах организмов любого региона. Она построена по модульному принципу и включает следующие модули: таксономический, географический, экологических параметров, описания источников данных, информации об отдельных клетках микроводорослей.

Модули объединены при помощи таблицы связей, которая состоит из полей для хранения идентификатора особи, ее таксономического названия, места и даты находки, значений экологических параметров, идентификатора источника данных.

Часто вместо упомянутой выше комплексной информации исследователям достаются ее фрагменты, в которых пропущены значения экологических характеристик проб или сведения об экземплярах организмов. В этом случае достаточно в записи не заполнять поля с отсутствующими значениями. Число таких неполных записей у одного вида будет равно числу комбинаций разных особей, мест находок, дат и литературных источников.

Описанная структура отличается от предложенной ранее схемы минимальной базы данных [11], в которой в качестве связующего элемента используется таблица особей. В настоящей версии таблица особей вынесена в отдельный блок и объединена со связующей таблицей, что расширяет возможности базы данных.

Представленная версия базы данных является первой общедоступной виртуальной системой, содержащей информацию о диатомовых микроводорослях водоемов Крыма.

Авторы благодарны Людмиле Николаевне Бухтияровой за кропотливый труд по сбору эколого-географической информации о диатомовых микроводорослях Крыма.

Работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ № 121030100028-0 «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана» и теме государственного задания ИПТС № 121122300072-3 «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бухтиярова Л.Н.* Bacillariophyta в мониторинге речных экосистем. Современное состояние и перспективы использования // Альгология. 1999. Т. 9, № 3. С. 89–103.

2. *Ruhland K.M., Paterson A.M., Smol J.P.* Lake diatom responses to warming: reviewing the evidence // Journal of Paleolimnology. 2015. Vol. 54. P. 1–35.

3. *Vasiljevic B., Simic S.B., Paunovic M., Zuliani T., Krizmanic J., Markovic V., Tomovic J.* Contribution to the improvement of diatom-based assessments of the ecological status of large rivers – the Sava River case study // Science of the Total Environment. 2017. Vol. 605–606. P. 874–883.

4. *Tornes E., Mor J.-R., Mandaric L., Sabater S.* Diatom responses to sewage inputs and hydrological alteration in Mediterranean streams // Environmental Pollution. 2018. Vol. 238. P. 369–378.

5. *Falasco E., Bona F., Badino G., Hoffmann L., Ector L.* Diatom teratological forms and environmental alterations: a review // Hydrobiologia. 2009. Vol. 623. P. 1–35.

6. *Falasco E., Ector L., Wetzel C.E., Badino G., Bona F.* Looking back, looking forward: a review of the new literature on diatom teratological forms (2010-2020) // Hydrobiologia. 2021. Vol. 848. P. 1675–1753.

7. *Bukhtiyarova L.N.* Diatoms of Ukraine. Inland waters. Kyiv: M. G. Kholodny Institute of Botany, 1999. 134 p.

8. *Куликовский М.С., Глущенко А.М., Генкал С.И., Кузнецова И.В.* Определитель диатомовых водорослей России. Ярославль: Филигрань, 2016. 804 с.

9. *Генкал С.И., Куликовский М.С., Кузнецова И.В.* Современные пресноводные центрические диатомовые водоросли России. Ярославль: Филигрань, 2020. 433 с.

10. *Лях А.М., Лелеков С.Г.* Модульная структура таксономической базы данных // Электронные информационные системы. 2018. № 2 (17). С. 59–70.

11. *Лях А.М.* Минимальная структура базы для хранения данных о биологическом разнообразии организмов // Труды СПИИРАН. 2020. Т. 19, № 4. С. 855–879.

12. *Лях А.М., Агаркова-Лях И.В.* Реляционная модель базы данных для хра-

нения эколого-биологических экспедиционных данных // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 3 (45). С. 98–106.

13. *Williams D.M.* Names, taxa and databases: some aspects of diatom nomenclature // Diatom Research. Vol. 36. № 2. P. 101–106.

14. *Guiry M.D., Guiry G.M.* AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2022. https://www.algaebase.org.

15. *Подгородецкий П.Д.* Крым: Природа: Справочное издание. Симферополь: Таврия, 1988. 192 с.

16. *Кузьмин С.Б.* Общее геоморфологическое районирование и картографирование Крымского полуострова // Климат и природа. 2021. № 2 (39). С. 3–36.

17. *Современные* ландшафты Крыма и сопредельных акваторий: монография / науч. ред. Е.А. Позаченюк. Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. 672 с.

18. *Олиферов А.Н., Тимченко З.В.* Реки и озера Крыма. Симферополь: Доля, 2005. 216 с.

19. *Дунаева Е.А., Коваленко П.И.* Типизация бассейнов рек Крыма по агроландшафтам и экологической нагрузке на них // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2013. № 4 (12). С. 157–167.

20. *Бухтиярова Л.Н.* Диатомовые водоросли горного Крыма: дис. … канд. биол. наук. Киев: Ин-т Ботаники им. Н.Г. Холодного, 1992.

TAXONOMIC DATABASE OF DIATOM MICROALGAE FROM CRIMEAN INLAND WATERS

A.M. Lyakh[1], I.V. Agarkova-Lyakh[2]

[1] A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, RF, Sevastopol, Nakhimov Av., 2
[2] Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

Information modules of a database for storing taxonomic, geographic, ecological, and other data on diatom microalgae found in inland waters of Crimean Peninsula are described. The structure of the database is universal and can store complex ecological and geographical information about any groups of organisms from any region. Data for the database is extracted from the monograph of L.N. Bukhtiyarova (1999) and systematized by authors. The information system for remote access to the database is located at: *3d-microalgae.org/diatoms/of/crimea*.

Keywords: biological database, taxonomic information system, geographical object, diatoms, taxonomic composition, Crimea, inland waters

REFERENCES

1. *Bukhtiyarova L.N.* Bacillariophyta v monitoringe rechnykh ekosistem. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy ispolzovaniya (Bacillariophyta in biomonitoring of river ecosystems. Modern situation and perspectives of application). *Internatinal Journal of Algae,* 1999, Vol. 9, No. 3, pp. 89–103.

2. *Ruhland K.M., Paterson A.M., and Smol J.P.* Lake diatom responses to warming: reviewing the evidence. *Journal of Paleolimnology*, 2015, Vol. 54, pp. 1–35.

3. *Vasiljevic B., Simic S.B., Paunovic M., Zuliani T., Krizmanic J., Markovic V., and Tomovic J.* Contribution to the improvement of diatom-based assessments of the ecological status of large rivers – the Sava River case study. *Science of the Total Environment,* 2017, Vol. 605–606, pp. 874–883.

4. *Tornes E., Mor J.-R., Mandaric L., and Sabater S.* Diatom responses to sewage inputs and hydrological alteration in Mediterranean streams. *Environmental Pollution,* 2018, Vol. 238, pp. 369–378.

5. *Falasco E., Bona F., Badino G., Hoffmann L., and Ector L.* Diatom teratological forms and environmental alterations: a review. *Hydrobiologia,* 2009, Vol. 623, pp. 135.

6. *Falasco E., Ector L., Wetzel C.E., Badino G., and Bona F.* Looking back, looking forward: a review of the new literature on diatom teratological forms (2010-2020). *Hydrobiologia,* 2021, Vol. 848, pp. 1675–1753.

7. *Bukhtiyarova L.N.* Diatoms of Ukraine. Inland waters. Kyiv: M. G. Kholodny Institute of Botany, 1999, 134 p.

8. *Kulikovsky M.S., Gluschenko A.M., Genkal S.I., and Kuznetsova I.V.* Opredelitel diatomovykh vodorosley Rossii (Idenification book of diatoms from Russia). Yaroslavl: Filigran, 2016, 804 p.

9. *Genkal S.I., Kulikovsky M.S., and Kuznetsova I.V.* Sovremennye presnovodnye tsentricheskie diatomovye vodorosli Rossii (The recent freshwater centric diatoms of Russia). Yaroslavl: Filigran, 2020, 433 p.

10. *Lyakh A.M. and Lelekov S.G.* Modulnaya struktura taksonomicheskoy bazy dannykh (The modular structure of a taxonomic database). *Electronic Information Systems,* 2018, No. 2 (17), pp. 59–70.

11. *Lyakh A.M.* Minimalnaya struktura bazy dlya hraneniya dannyh o biologicheskom raznoobrazii organizmov (Minimal structure of the database for storing organisms' biodiversity data). *SPIIRAS Proceedings*, 2020, Vol. 19, No. 4, pp. 855–879.

12. *Lyakh A.M. and Agarkova-Lyakh I.V.* Relyatsionnaya model bazy dannykh dlya khraneniya ekologo-biologicheskikh ekspeditsionnykh dannykh. *Monitoring systems of environment,* 2021, № 3 (45), pp. 98–106.

13. *Williams D.M.* Names, taxa and databases: some aspects of diatom nomenclature. *Diatom Research,* Vol. 36, No. 2, pp. 101–106.

14. *Guiry M.D. and Guiry G.M.* AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, 2022. https://www.algaebase.org.

15. *Podgorodetsky P.D.* Krym: Priroda: Spravochnoe izdanie (The Crimea: Nature. A reference book). Simferopol: Tavriya, 1988, 192 p.

16. *Kuzmin S.B.* Obschee geomorfologicheskoe rayonirovanie i kartografirovanie Krymskogo poluostrova (General geomorphological zoning and mapping of the Crimean Peninsula). *Climate & Nature,* 2021, No. 2 (39), pp. 3–36.

17. Sovremennye landshafty Kryma i sopredelnykh aquatoriy: Monografiya (Modern landscapes of the Crimea and adjacent water areas: Monograph) / Sci. edt. E.A. Pozachenyuk. Simferopol: Biznes-Inform, 2009. 672 p.

18. *Oliferov A.N. and Timchenko Z.V.* Reki i ozera Kryma (Rivers and lakes of Crimea). Simferopol: Dolya, 2005. 216 p.

19. *Dunaeva E.A. and Kovalenko P.I.* Tipizatsiya basseynov rek Kryma po agrolandshaftam i ekologicheskoy nagruzke na nikh (River basins typification on Crimea by agrolandscapes and ecological load). *Nauchny zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii.* 2013, No. 4 (12), pp. 157–167.

20. *Bukhtiyarova L.N.* Diatomovye vodorosli gornogo Kryma: Dis. … kand. biol. nauk (Diatoms of the mountain Crimea. Cand. biol. sci.), Kiev: In-t Botaniki N.G. Kholodnogo, 1992, 18 p.

УДК 674.816 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-31-35

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА БИОРАЗЛАГАЕМОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С.С. Назирова, Д.С. Бычек, Л.Р. Асфандиярова, Л.З. Касьянова, А.А. Исламутдинова, Э.К. Аминова

ИХТИ ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Стерлитамаке, РФ, Республика Башкортостан, г. Стерлитамак, пр. Октября, 2
E-mail: k.elmira.k@yandex.ru

Выполнен анализ существующих экологических проблем, вызванных скоплением древесных отходов, а именно отходов лесопиления и деревообработки; изучена возможность производства биоразлагаемых изделий из отходов деревообрабатывающей промышленности, в частности хвойных и лиственных опилок; проведен анализ физико-химических характеристик исходных компонентов сырья для получения экологически чистого древесного композита; произведены опытные образцы изделий; проведен анализ рынка; найден оптимальный связующий компонент отечественного производства.

Ключевые слова: биоразлагаемый материал, древесные опилки, силикат натрия, композиционный состав, связующий компонент.

Поступила в редакцию: 14.05.2022. После доработки: 06.06.2022.

Введение. В Российской Федерации особый интерес в изучении представляют биоматериалы на основе отходов деревообрабатывающей промышленности. Ведь немаловажной является проблема рационального использования отходов лесопиления и деревообработки, и считается актуальной на протяжении многих лет. Древообрабатывающие предприятия представляют собой источник колоссального количества опилок [1, 2]. Скопления отходов лесопиления являются источником развития болезней леса, увеличения вредных насекомых, но в большей степени увеличивают количество лесных пожаров, которые уничтожают огромное количество лесных запасов, выбрасывают в атмосферу вредные вещества, уменьшают ареал животных и усиливают парниковый эффект.

Из приведенных выше данных следует, что многие существующие производства нуждаются в радикальном пересмотре существующих технологий, источников сырья, в сторону экологичности, а также особое внимание возможности замены используемого сырье на вторичное. Так, отходы лесопиления, хоть и перерабатываются, но требуют квалифицированного подхода к их утилизации. В рамках работы данное сырье предлагается использовать в качестве наполнителя в производстве биоразлагаемых материалов.

Целью работы является получение материала на основе измельченной древесины и связующего вещества для изготовления разлагающихся изделий, приносящих наименьший вред окружающей среде, а также решающих проблему с переработкой растительных отходов.

Ход работы, методы и полученные результаты. В работе представлено следующее решение данной проблемы: изготавливать биоразлагаемый материал, а именно изделия **на его основе** для выращивания рассады, которые будет возможно при переносе растений в почву не убирать, а высаживать в грунт вместе с ними.

Для изделий предлагается простой состав, куда входят древесные отходы и связующий компонент. В ходе поиска решения выполнен анализ различных видов исходного сырья и связующих компонентов. Наилучшим связующим веществом для решения поставленных задач является силикат натрия (или калия) – жидкое стекло или канцелярский клей Na_2SiO_3.

Так жидкое стекло и канцелярский клей, обладая щелочной реакцией раствора, оказывают весьма комплексное действие на почвы, вызывая не только прямое действие на растения, но и опосредованное – через нормализацию кислотности почвы, улучшения микрофлоры почвы и т.д. Кроме того, кремниевые удобрения, чем и является силикат натрия, усиливает действие других удобрений - азотных, калийных, фосфорных и повышают солеустойчивость растений. Отсюда можем сделать вывод, что он не то что нетоксичен для почвы, а наоборот оказывает благоприятное влияние [3].

Опилки делают почву более рыхлой – помогают ей дышать, препятствуют возникновению корки на поверхности земли, поэтому рыхлить почву после посадки нужно будет меньше. Также они поглощают и удерживают влагу для растений, что при грамотном подходе тоже является положительной функцией.

Также большое значение имеет, каких пород стружка, так как стружка разных деревьев подходит не всем растениям. Породный состав – количественное соотношение древесины разных пород в смеси измельчённой древесины.

Хороши для культур отходы лиственных пород деревьев, кроме дубовых. Хвойные породы насыщают почву кислотой, потому принимаются только любителями такой среды – помидорами, огурцами, морковью и другими.

В данной работе в качестве экспериментальных образцов использовалась биомасса двух пород древесины: хвойных и мягколиственных пород, а также их смеси, которые наиболее распространены на территории России.

Одним из основных факторов, определяющих механическую прочность и водостойкость, является плотность образца создаваемого материала. Исследование зависимостей качественных характеристик изделий от параметров сырья и способа его обработки позволяет получать продукцию с заданными характеристиками.

В ходе работы исследовалось влияние различных видов пород в зависимости от крупности, плотности и влажности опилок на прочностные свойства создаваемого материала для изделий в которых выращивают рассаду, их качественные способности и возможное влияние на растения.

Древесные опилки – отходы деревообработки, мелкие частицы древесины, образованные в процессе пиления дерева. Технологические опилки по ГОСТ 18320-78 должны содержать не более 8% коры, 5% гнили и 0,5% минеральных примесей, размер фракции древесных опилок составляет 1…30 мм [4]. При этом, допускается содержание фракции менее 1 мм в количестве до 10% и фракции более 30 мм в количестве до 5% от общей опилочной массы.

Расчёт плотности опилок для использования в изделиях выполнен по ГОСТ 18320-78 «Опилки древесные» [4]. Насыпная плотность – отношение измельчённой древесной массы к её объёму.

Учёт опилок производится в кубических метрах плотной массы в зависимости от породы дерева, с округлением до 0,1 куб. м. Коэффициенты перевода объёма опилок в плотную древесную массу: 0,28 – свежеотгруженные опилки, 0,34 – транспортировка от 5 км до 50 км, 0,36 – перевозка от 50 км до 500 км, 0,38 – в конце транспортировки на расстояние свыше 500 км. Средняя насыпная плотность древесных опилок колеблется в пределах 120–200 кг/м³ для сухих (8–15% влажности) и 320–580 кг/м³ для влажных (от 15% влажности) опилок.

В древесной массе при влажности от 30% начинаются грибковые гнилостные процессы. Поэтому, измельчённая древесина, влажностью до 30% принимается, как пригодная к хранению. Остальную древесину нужно сушить.

Влажность сырья определяют по ГОСТ 9621-72 на трех навесках не менее 3 г каждая, взятых из точечной пробы [5]. Данный эксперимент проводится аналогично и не менее 3 раз для любых выбранных температур в печи в одном и том же выбранном интервале времени.

Однородность, отсутствие посторонних вкраплений определяли на точечной

пробе визуально без применения увеличительных приборов.

Содержание гемицеллюлозы и целлюлозы в древесине определяли по [6], для чего проводили разделение легкогидролизуемых (ЛГПС) и трудногидролизуемых (ТГПС) полисахаридов, используя различные условия гидролиза.

Определение лигнина проводили по методу Класона с использованием 72% H_2SO_4 [7, 8]. Перед проведением анализов выполняли обессмоливание древесных опилок в соответствии со стандартным методом ANSI/ASTM D 1105 [9]. Для определения зольности высушенные опилки прокаливали в фарфоровом тигле в муфельной печи при температуре 575±25°С в течение 3–4 ч до полного удаления углерода (отсутствие черных точек), затем остужали и охлаждали в эксикаторе, взвешивали и продолжали прокаливать по 1 ч до достижения постоянной массы [10].

В результате проведения экспериментов были получены следующие данные по химическому составу. Химический состав опилок хвойных пород (% от массы абс. сух. древесины): углеводы (целлюлоза и гемицеллюлоза) – 65%, лигнин – 27,6%, экстактивные вещества – 7%, зола – 0,4%; опилок лиственных пород деревьев: около 70% углеводов (целлюлоза и гемицеллюлоза), 27% лигнина, 8% экстактивных веществ, 0,5% золы.

Общие сравнительные данные, полученные в ходе исследования, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты анализа свойств различных видов опилок

Показатели качества	Древесные опилки		
	Хвойных пород	Мягколиственных пород	Смеси (50% хвои и 50% листа)
Плотность, кг/дм^3	1,145	1,142	1,144
Насыпная плотность, кг/дм^3	525	512	521
Зольность, %	0,4	0,5	0,5
Влажность, %	8,1	8,5	8,3
Однородность, отсутствие посторонних вкраплений	Посторонние вкрапления отсутствуют		

В рамках эксперимента были изготовлены и испытаны образцы из древесных отходов двух рецептур, в качестве основного компонента выступали опилки хвойных и лиственных пород (фракция 0,5 – 5 мм), в соотношении 1:1 в готовых образцах.

Придя к выводу, что высокая стоимость существующих изделий из растительных отходов связана со стоимостью импортных полимеров, используемых в качестве связующих веществ. В работе был рассмотрен вопрос о возможности удешевления сырья, с последующей из этого недорогой стоимостью готового изделия. Учитывая критерии доступности, экологичности и экономической составляющей сырья, наиболее перспективным и безопасным будет являться выполненный образец, в котором в качестве связующего вещества использовали жидкое стекло. Полученный образец биоразлагаемого материала, из которого можно делать изделия для выращивания рассады, обходит все возможные варианты отечественного производства по дешевизне сырья. Он также является прекрасным удобрением для почвы и

растений, что полностью удовлетворяет заявленные требования.

Смешав древесные опилки со связующим компонентом, произвели формовку будущих изделий, которые полностью высушили. В полученные образцы изделий посадили ростки помидоров, периодически ухаживали за ними месяц. После рассаду высадили, не вытаскивая из изделий, в открытый грунт. В процессе эксперимента растения не погибли, хорошо росли и развивались, что на практике доказывает пригодность данного изделия для выращивания растений.

Выводы. Таким образом, полученный нами биоразлагаемый древесно-композиционный материал на основе хвойных и лиственных опилок, в соотношении 1:1, и силикатного клея был сформован в железных формах объемом 0,5 и 1 л, высушен и готов к посадке растений. Так, в экспериментальные горшки были высажены ростки помидор, взращена рассада и после высажена в открытый грунт вместе с изделием. Дальнейший рост растений в почве проходил хорошо. Полное разложение материала было отмечено через 60 дней после высаживания в открытый грунт. Разложение хвойных и лиственных опилок, а также присутствие связующего компонента в почве позволят создать благоприятную среду для роста растений, не повышая ее кислотность.

В ходе настоящей работы был выполнен анализ существующих экологических проблем от скопления отходов деревообрабатывающей и лесопильной промышленности; изучена возможность производства изделий из отходов деревообрабатывающей промышленности; проведен анализ физико-химических характеристик исходных компонентов сырья для получения экологически чистого древесного композита; произведены опытные образцы изделий и выявлены наиболее перспективные, где в качестве наполнителя взята смесь хвойных и лиственных опилок в соотношении 1:1, а в качестве основного склеивающего компонента используется силикат натрия; найден оптимальный связующий компонент отечественного производства.

В России культура переработки вторсырья еще не развита, вероятно это является главной причиной высокой стоимости многих выпускаемых материалов из вторсырья. Что еще раз подчеркивает важность и актуальность освещаемой темы.

Получение биоразлагаемых материалов и производство изделий хозяйственного назначения очень перспективное направление в промышленности, а именно в переработке древесных отходов. Так правильная организация безотходного производства или утилизации древесных отходов позволит российским лесопромышленным компаниям не только повысить уровень доходов, но и принять участие в сохранении лесов России и улучшении экологической ситуации во всем мире.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тюкина Ю.П., Макарова Н.С.* Технология лесопильно-деревообрабатывающего производства. М.: Высшая школа, 1988. 271 с.

2. *Падерин В.* Рентабельность лесопиления и проблемы развития лесопиления в России [Текст] // ЛесПромИнформ. 2014. № 1 (99). URL: www.lesprominform.ru/jarchive/articles/itemshow/3572.

3. *Матыченков В.В., Бочарникова Е.А., Амосова Я.М.* Влияние кремниевых удобрений на растение и почву // Агрохимия. 2002. № 2. С. 86–93.

4. *ГОСТ 18320–78* «Опилки древесные» [Электронный ресурс]: URL: https://docs.cntd.ru/document/1200014994.

5. *ГОСТ 9621-72* Древесина слоистая клееная. Методы определения физических свойств (с Изменением № 1, 2, 3) / ГОСТ от 18 июля 1972 г. № 9621–72. [Электронный ресурс]: URL: https://docs.cntd.ru/document/1200017688.

6. *Tappi,* 2009. Carbohydrate composition of extractive-free wood and wood pulp bygas–liquid chromatography (Reaffirmation of T 249 cm-09).

7. *Tappi,* 2006. Acid-insoluble lignin in wood and pulp (Reaffirmation of T 222 om-02).

8. *Sluiter J.B., Ruiz R.O., Scarlata CH.J., Sluiter A.D., Templeton D.W.* Compositional analysis of lignocellulosic feedstocks. 1. Review and description of methods. // J. Agric. Food Chem. 2010. Vol. 58. P. 9043–9053.

9. Базарнова Н.Г. Химия древесины и ее основных компонентов: Методическое пособие. Барнаул: Алтайский гос. ун-т, 2002. 50 с.

10. *Tappi,* 2002. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C (Reaffirmation of T 211 om-02).

PRODUCTION OPPORTUNITIES OF BIODEGRADABLE MATERIAL FROM WASTE OF THE WOOD PROCESSING INDUSTRY

S.S. Nazirova, D.S. Bychek, L.R. Asfandiyarova, L.Z. Kasyanova, A.A. Islamutdinova, E.K. Aminova

Institute of Chemical Technology and Engineering, Ufa State Petroleum Technical University in Stertitamak, Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Sterlitamak, October Av., 2
E-mail: k.elmira.k@yandex.ru

In the course of this work, an analysis of existing environmental problems was carried out; the possibility of manufacturing products from woodworking industry waste, in particular coniferous and hardwood sawdust, was studied; an analysis of the physicochemical characteristics of the initial components of raw materials for obtaining an environmentally friendly wood composite was carried out; prototypes of products were produced; market analysis was made; the optimal binding component of domestic production was found.
Keywords: biodegradable material, sawdust, sodium silicate, composite composition, binder.

REFERENCES

1. *Tyukina Yu.P. and Makarova N.S.* Technology of sawmill and woodworking production (Technology of sawmilling and woodworking production.) - M .: Higher school, 1988. 271 p.

2. *Paderin V.* Rentabel'nost' lesopileniya i problemy razvitiya lesopileniya v Rossii (Profitability of sawmilling and problems of development of sawmilling in Russia). LesPromInform. 2014. No. 1 (99). URL: www.lesprominform.ru/jarchive/articles/itemshow/3572

3. *Matychenkov V.V., Bocharnikova E.A., and Amosova Ya.M*. Vliyanie kremnievyh udobrenij na rastenie i pochvu (Influence of silicon fertilizers on the plant and soil) . *Agrochemistry*. 2002. No. 2, pp. 86–93.

4. *GOST 18320–78.* URL: https://docs.cntd.ru/document/1200014994.

5. *GOST 9621–72.* No. 9621-72. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200017688.

6. *Tappi*, 2009. Carbohydrate composition of extractive-free wood and wood pulp bygas–liquid chromatography (Reaffirmation of T 249 cm-09).

7. *Tappi*, 2006. Acid-insoluble lignin in wood and pulp (Reaffirmation of T 222 om-02).

8. *Sluiter J.B., Ruiz R.O., Scarlata CH.J., Sluiter A.D., and Templeton D.W.* Compositional analysis of lignocellulosic feedstocks. 1. Review and description of methods. J. Agric. food chem. 2010. Vol. 58, pp. 9043–9053.

9. *Bazarnova N.G.* Himiya drevesiny i ee osnovnyh komponentov. Metodicheskoe. (Chemistry of wood and its main components: Methodological guide) Barnaul: Altajskij gos. un-t, 2002. 50 p.

10. *Tappi,* 2002. Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C (Reaffirmation of T 211 om-02).

УДК 621.2.083 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-36-45

МЕТОД И УСТРОЙСТВА С ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫМИ ДАТЧИКАМИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

В.А. Гайский

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: gaysky@inbox.ru

Для повышения точности используется принцип многоканальности для построения инвариантных систем. Предлагается метод измерения давления с использованием нескольких тензорезисторных датчиков, имеющих разные чувствительности, аппроксимируемые полиномами степени m для давления и системы n для температуры, формированием системы из $(m+1)(n+1)-1$ линейных алгебраических уравнений из функций преобразования, как произведений полиномов и относительными изменениями сопротивлений тензорезисторов и решением системы относительно измеряемого давления. Рассматриваются варианты устройств для опроса тензорезисторов на постоянном и знакопеременном токе.
Ключевые слова: давление, тензорезистор, функция преобразования.

Поступила в редакцию: 27.04.2022.

Введение. Известны широко используемые в океанологии тензорезистивные измерители гидростатического давления [1, 2]. Эти измерители работают непосредственно в морской среде при различной температуре, относительно дешевы и обеспечивают средние точности измерения (порядка десятых долей процента). Необходимо повышение их точности. Прежде всего выясним причины ограничения точности существующих измерителей.

Датчики в этих известных измерителях содержат по четыре тензорезистора (металлических или полупроводниковых), размещенных на чувствительных к давлению мембранах и преобразующих механическое перемещение в электрическое сопротивление. Тензорезисторы обычно включены в плечи четырехплечего моста, с разными знаками чувствительности в смежных плечах для получения большей амплитуды выходного сигнала (постоянного или переменного тока) с диагонали моста. При этом используют для их изготовления современную интегральную технологию и стремятся сделать эти тензорезисторы идентичными [3].

С использованием интегральной технологии «кремний на сапфире» в отечественных промышленных измерительных преобразователях давления типа «Сапфир-22» достигнуты следующие нормируемые метрологические характеристики [1]: погрешность линейности по абсолютному значению не превышает ±0,3% диапазона выходного сигнала; случайная составляющая погрешности не выше ±0,1%; температурная погрешность не выше ±0,5–1% на 10ºС. Однако таких точностных характеристик недостаточно для использования этих и других массовых тензометрических датчиков в высокоточных СТД-зондах и обычно для каждого датчика проводят индивидуальную градуировку, например, [4].

Индивидуальная градуировка тензорезисторных датчиков по давлению и температуре позволяет примерно в 2–3 раза улучшить точность (до ±0,05%), но все равно не обеспечивает точности порядка ±0,01%, которая необходима в современных океанологических зондах.

Достаточно подробный точностной анализ измерителя гидростатического давления с тензометрическими датчиками, линейными по чувствительности к давлению и температуре проведен в [4] для измерителей с датчиками типа «Сапфир-22». В нем использованы 4 тензодатчика, включенных по мостовой схеме. Очевидно, что в борьбе за точ-

ность прежде всего необходимо избавиться от погрешностей нелинейности по давлению и температуре. Однако использование четырехплечего моста для включения 4-х тензорезисторов существенно увеличивает нелинейность сквозного канала (в данном случае выходного напряжения моста по отношению к давлению), поскольку при выработке выходного сигнала моста, имеет место перемножение характеристик двух датчиков, что даже при их линейности и неидентичности дает составляющие сигнала с квадратичной нелинейностью.

Для примера рассмотрим четырехплечий мост из линейных тензорезисторов в порядке против часовой стрелки сверху вниз, сопротивление которых равны

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{10}(1-\beta_1 P)\,, \\ R_2 &= R_{20}(1+\beta_2 P)\,, \\ R_3 &= R_{30}(1-\beta_3 P)\,, \\ R_4 &= R_{40}(1+\beta_4 P)\,. \end{aligned} \qquad (1)$$

При подаче напряжения $U_{вх}$ на вертикальную диагональ моста для выходного напряжения $U_{вых}$ на горизонтальной диагонали получим

$$U_{вых} = U_{вх}\left(\frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_3}{R_3+R_4}\right) = \frac{R_2(R_3+R_4)-R_3(R_1+R_2)}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)}\,. \qquad (2)$$

Примем $R_{i0}=1,\ i=\overline{1,4}$ и, подставив выражения (1), получим

$$\frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{(\beta_1+\beta_2+\beta_3+\beta_4)P+[(\beta_2-\beta_1)\beta_3+\beta_2(\beta_4-\beta_3)]P^2}{4+2(\beta_2-\beta_1-\beta_3+\beta_4)P+[(\beta_1-\beta_2)\beta_3-(\beta_1-\beta_2)\beta_4]P^2}\,. \qquad (3)$$

Если все тензорезисторы идентичны, то все $\beta_i=\beta$ равны и выражение (3) преобразуется в

$$\frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \beta P\,, \qquad (4)$$

что соответствует общепринятой модели без учета температурной зависимости.

Однако, имеют место технологические погрешности изготовления тензорезисторов на уровне, хотя бы десятых долей процента и новая неконтролируемая нелинейность будет формироваться также на этом уровне. Следовательно, использование мостовой схемы включения тензоэлементов, введенной ранее для повышения амплитуды выходного сигнала при слабочувствительных металлических тензорезисторах и потерявшей смысл для полупроводниковых тензорезисторов, чувствительность которых на два порядка выше, не целесообразна.

С учетом температурной зависимости сопротивлений тензорезисторов построение индивидуальной градуировочной характеристики становится громоздкой процедурой, приводит к необходимости одновременно измерять температуру тензорезисторов [4] или мембраны [5].

При этом существенно усложняются устройства, градуировочная характеристика от двух измеряемых величин (давления и температуры), становится полиномом высокой степени (восьмой [4]) и неоднозначной. Что ограничивает возможности повышения точности измерения давления.

Основная часть. Целесообразно использовать схемно-алгоритмические способы повышения точности [6]. В этом источнике для измерения двух неизвестных давлений двумя измерителями с известными разными функциями преобразования, но неизвестными «смещениями нуля» (аддитивными составляющими), зависящими от времени и

температуры, осуществляют поочередное измерение первого и второе давлений первым и вторым измерителем, формируют систему из двух уравнений разности измерений и её решением определяют первое и второе измеряемые давления, свободные от неизвестного «смещения нуля». Это предложение не решает задачу измерения гидростатического давления в океанологическом зонде и в более общих случаях измерения давления жидкости или газа. Однако по сути метода, использование нескольких каналов измерения и решения системы уравнений по результатам измерения, оно близко к предлагаемому методу.

Цель повышения точности достигается тем, что измерители гидростатического давления с мембранами выполняют с отдельными тензорезисторными чувствительными преобразователями, имеющими существенные различия по чувствительности β к давлению и по чувствительности α к температуре, математической моделью которых с достаточной точностью аппроксимирующей зависимости сопротивления от давления и температуры является произведение полиномов степени m для давления P и степени n для температуры, формируют систему линейных алгебраических уравнений из функций преобразования, измеряют относительное изменение сопротивления $\frac{R_1}{R_{io}}$ тензорезистора и давление вычисляют по выражению

$$P = \frac{\Delta_P}{\Delta} \ , \qquad (5)$$

где Δ – определитель системы линейных алгебраических уравнений, элементы *i*-ой строки расширенной матрицы которой имеют вид

$$\underbrace{\beta_{i1}\ \beta_{i2}\ldots\beta_{im}}_{m}\ \underbrace{\alpha_{i1}\ \alpha_{i2}\ldots\alpha_{in}}_{n}\ \underbrace{\{\beta_{iJ}\ \alpha_{is}\}}_{mn\,nap\ j=\overline{1,m},\ s=\overline{1,s}}\ , \gamma_i \ , \qquad (6)$$

где $\gamma_i = \frac{R_i}{R_{io}} - 1, \ \ i = \overline{1,(m+1)(n+1)-1}$;

Δ_P – определитель системы при замене в матрице определителя Δ столбца β_{i1} на столбец γ_i,

где R_{i0} – градуировочное сопротивление *i*-го тензорезистора при начальных давлении и температуре; R_i – измеряемое сопротивление тензорезистора при измеряемом давлении и не измеряемой температуре θ в модели измерителя

$$R_{i0}\left(1+\sum_{j=-1}^{m}\beta_{ij}P^j\right)\left(1+\sum_{s=-1}^{n}\alpha_{is}\theta^s\right) = R_i \ , \qquad i = \overline{1,k} \ . \qquad (7)$$

Рассмотрим обоснование предложенного метода. Предполагаем, что возможно произвольно неточное изготовление полупроводниковых тензорезисторов с разными функциями преобразования, которые с удовлетворительной точностью аппроксимируются моделью из произведения полинома степени m для преобразования давления P в сопротивление R и полинома степени n для преобразования температуры θ в сопротивление R. В этом случае для резисторного тензоэлемента можем записать

$$R = R_0\left(1+\sum_{j=1}^{m}\beta_j P^j\right)\left(1+\sum_{s=1}^{n}\alpha_s\theta^s\right) .$$

При этом разные коэффициенты чувствительности по давлению β_{ij} и температуре α_{is} для разных датчиков

$i=\overline{1,(m+1)(n+1)-1}$ задаются технологическим путем с произвольным разбросом [7].

После изготовления производится определение сопротивления R_0 тензорезистора при начальной температуре (например, при минимальной) и нулевом (атмосферном) давлении. Далее при фиксированной температуре изменением давления идентифицируются m коэффициентов β_j полинома

$$R=R_0\left(1+\sum_{j=1}^{m}\beta_j P^j\right), \qquad (8)$$

а при фиксированном давлении идентифицируются n коэффициентов α_s полинома

$$R=R_0\left(1+\sum_{s=1}^{n}\alpha_s\theta^s\right). \qquad (9)$$

Таким образом считаем m коэффициентов чувствительности $\beta_j\left(j=\overline{1,m}\right)$ по давлению и n коэффициентов чувствительности $\alpha_s\left(s=\overline{1,n}\right)$ по температуре для каждого конкретного тензорезистора известными.

Для группы из k тензорезисторов справедливо

$$\left(1+\beta_{i1}P+\beta_{i2}P^2+\ldots+\beta_{im}P^m\right)\left(1+\alpha_{i1}\theta+\alpha_{i2}\theta^2+\ldots+\alpha_{in}\theta^n\right)=\frac{R_i}{R_{i0}},$$
$$i=\overline{1,(m+1)(n+1)-1}, \qquad (10)$$

где $(m+1)(n+1)-1=k$ – число тензорезисторов, равное k – числу всех неизвестных в уравнениях (1, 2), из которых интерес представляет одно P.

Пример 1 при $m=1$ и $n=1$, $k=3$.

$$\beta_{i1}P+\alpha_{i1}\theta+\beta_{i1}\alpha_{i1}\theta P=\frac{R_i}{R_{i0}}-1=\gamma_i, \quad i=\overline{1,3}. \qquad (11)$$

Расширенная матрица системы (11) имеет вид (12)

$$\left|\begin{array}{c|c|c|c} \beta_{11} & \alpha_{11} & \beta_{11}\alpha_{11} & \gamma_1 \\ \beta_{21} & \alpha_{21} & \beta_{21}\alpha_{21} & \gamma_2 \\ \beta_{31} & \alpha_{31} & \beta_{31}\alpha_{31} & \gamma_3 \end{array}\right| \qquad (12)$$

Решение системы относительно P

$$P=\frac{\Delta_P}{\Delta}, \qquad (13)$$

где $\Delta=\alpha_{11}\alpha_{21}\beta_{31}(\beta_{21}-\beta_{11})+\alpha_{21}\alpha_{31}\beta_{11}(\beta_{31}-\beta_{21})+\alpha_{11}\alpha_{31}\beta_{21}(\beta_{11}-\beta_{31})$, (14)

$$\Delta_P=\gamma_1\alpha_{21}\alpha_{31}(\beta_{31}-\beta_{21})+\gamma_2\alpha_{11}\alpha_{31}(\beta_{11}-\beta_{21})+\gamma_3\alpha_{11}\alpha_{11}(\beta_{21}-\beta_{11}). \qquad (15)$$

Из приведенных выражений видно, что в решение системы уравнений относительно измеряемого давления входят только градуировочные коэффициенты чувствительности к давлению β_{ij} и температуре α_{is}, а также коэффициенты относительного изменения сопротивлений датчиков $\gamma_i = \dfrac{R_i - R_{i0}}{R_{i0}}$, контролируемые только по измеряемым сопротивлениям R_i $\left(i = \overline{1,k}\right)$ или отношению $\dfrac{R_i}{R_{i0}}$. При этом система определена и имеет единственное решение, если все β_i и α_i разные.

Второе неизвестное значение температуры θ и комбинаторные неизвестные $P\theta$ не нужны и не требуется их определять из решения системы уравнений (11) и тем более измерять отдельно температуру θ и вносить какую-либо ещё дополнительную коррекцию. Вся необходимая информация для температурной коррекции уже содержится в расширенной матрице системы (12).

Пример 2 $m = 2$, $n = 2$, $k = 8$.

Уравнение модели для *i*-го тензоэлемента

$$\beta_{i1}P + \beta_{i2}P^2 + \alpha_{i1}\theta + \alpha_{i1}\beta_{i1}\theta P + \alpha_{i1}\beta_{i2}\theta P^2 + \alpha_{i2}\theta^2 + \beta_{i1}\alpha_{12}P\theta^2 + \alpha_{i2}\beta_{12}P^2\theta^2 = \frac{R_i - R_{i0}}{R_{i0}},$$

$$i = \overline{1,8}. \quad (16)$$

Строка расширенной матрицы системы (16) имеет вид

$$\left|\beta_{11}\,\beta_{12}\,\alpha_{11}\left(\alpha_{i1}\,\beta_{i1}\right)\left(\alpha_{i1}\,\beta_{i2}\right)\alpha_{i2}\left(\beta_{i1}\alpha_{i2}\right)\left(\alpha_{i2}\,\beta_{i2}\right)\middle|\gamma_i\right| \quad i = \overline{1,8}\ . \quad (17)$$

Пример 3 Общий случай $m = n$, $n = n$, $k = (m+1)(n+1) - 1$.

Модель системы в выражениях (7, 10).

Строка в расширенной матрице системы (6), из которой любым известным способом решения СЛАУ получаются измеренно-вычисленные значения P по выражению (13).

Выражение для определения P можно записать в виде

$$P = C_1\gamma_1 + C_2\gamma_2 + C_3\gamma_3 + \ldots + C_k\gamma_k\ , \quad (18)$$

где коэффициенты C_i при свободных членах γ_i равны разложению столбца P_i по γ_i и включают коэффициенты матрицы Δ_P, умноженные на их адъюнкты и деленные на определитель системы.

В принципе, при градуировке можно определить коэффициенты C_i из выражения (18). Для этого необходимо задать не менее k известных значений P_j и решить относительно C_i систему линейных алгебраических уравнений вида

$$P_j = \sum_{i=1}^{k} \gamma_{ji} C_i\ , \quad (19)$$

где $j = \overline{1,k}, i = \overline{1,k}$.

Если сформировать уравнений (19) $j >> k$, то можно уточнить коэффициенты C_i за счет решения системы (19) методом наименьших квадратов.

Таким образом предполагается, что за счет увеличения степеней полиномов в модели тензорезисторов и использования нескольких отдельных различных по чувствительности, не обязательно точных при изготовлении по номиналам коэффициентов чувствительности и начальному сопротивлению, но известных точно из градуировки, погрешности нелинейности и влияния температуры существенно уменьшаются, а конструкция датчика упрощается.

Может быть полезна экспертная оценка потенциальной индивидуальной точности измерителей гидростатического давления, построенных по предлагаемому методу и приведенная в табл. 1.

Таблица 1. Экспертные оценки точности

№	m	n	k	Модели	Точность, %
1	1	1	3	$R_{i0}\left(1+\beta_{i1}P\right)\left(1+\alpha_{i1}\theta\right)$	0,5
2	2	1	5	$R_{i0}\left(1+\beta_{i1}P+\beta_{i2}P^2\right)\left(1+\alpha_{i1}\theta\right)$	0,1
3	3	1	7	$R_{i0}\left(1+\beta_{i1}P+\beta_{i2}P^2+\beta_{i3}P^3\right)\left(1+\alpha_{i1}\theta\right)$	0,05
4	3	2	11	$R_{i0}\left(1+\beta_{i1}P+\beta_{i2}P^2+\beta_{i3}P^3\right)\left(1+\alpha_{i1}\theta+\alpha_{i2}\theta^2\right)$	0,03
5	3	3	15	$R_{i0}\left(1+\beta_{i1}P+\beta_{i2}P^2+\beta_{i3}P^3\right)\left(1+\alpha_{i1}\theta+\alpha_{i2}\theta^2+\alpha_{i3}\theta^3\right)$	0,02
6	4	4	24	$R_{i0}\left(1+\beta_{i1}P+\beta_{i2}P^2+\beta_{i3}P^3+\beta_{i4}P^4\right)\times$ $\times\left(1+\alpha_{i1}\theta+\alpha_{i2}\theta^2+\alpha_{i3}\theta^3+\alpha_{i4}\theta^4\right)$	0,01

Рассмотрим устройства для осуществления предложенного метода.

В общем случае возможно использование стандартных устройств, измеряющих сопротивления тензорезисторов. Однако из выражения (10) следует, что информативным параметром является отношение R_i / R_{i0}, которое и желательно получить в результате измерения.

Структурная схема предлагаемого устройства для опроса тензорезисторов постоянным током представлена на рис. 1.

В состав устройства входит блок 1 тензорезисторов $1_1,...,1_k$, размещенных на воспринимающей давление мембране и, подключенных к выходу напряжения блока 2, блок 3 токовых ключей $3_1,...,3_k$, служащий для подачи на тензорезисторы постоянного тока от выхода блока 4 генератора тока, выполненного на транзисторе 5 с токозадающим образцовым резистором 6 номиналом R_0 в эмиттере и дифференциальном усилителе 7, первый вход которого соединен с подключенным к выходу источника напряжения цепочечным делителем напряжения на резисторах 8 и 9, номиналом r_1 и r_2, второй вход усилителя соединен с эмиттером транзистора, а выход подан на базу транзистора 5. Для съема напряжения с тензорезисторов служит блок 10 потенциальных ключей $10_1,...,10_k$, выход которого подан на

блок 11 формирования выходного сигнала на первый вход дифференциального усилителя 12, в котором второй вход соединен с выходом источника напряжения 2, а выход подан на вход аналого-цифрового преобразователя 13. Блок 14 служит для управления работой токовых и потенциальных ключей.

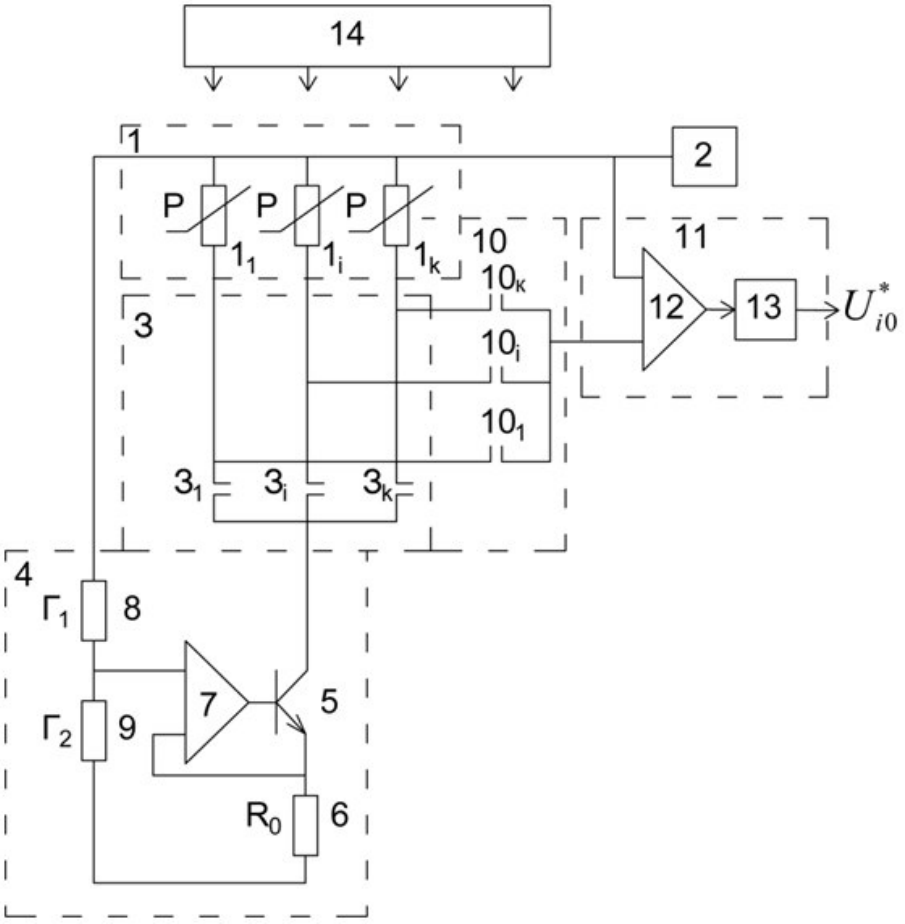


Рис. 1. Структурная схема устройства для опроса тензорезисторов постоянным током
Fig. 1. Structural diagram of the device for interrogation strain gauges with direct current

Требования к электронным компонентам устройства являются общепринятыми. Переходные сопротивления ключей практически не влияют на работоспособность устройства из-за того, что токовые ключи находятся в цепях заданного тока, а потенциальные ключи служат для передачи напряжения на высокоомный вход дифференциального усилителя.

На первый вход дифференциального усилителя 7 поступает напряжение, равное

$$e = \frac{Er_2}{r_1 + r_2}, \qquad (20)$$

где E – выходное напряжение источника 2.

Генератор тока формирует ток, равный

$$I = \frac{e}{R_0} = \frac{Er_2}{(r_1 + r_2)R_0} \ . \tag{21}$$

При опросе *i*-го тензорезистора на последнем формируется напряжение

$$U_{i0}^* = R_i I = \frac{Er_2}{(r_1 + r_2)} \cdot \frac{R_i}{R_0} = const \frac{R_i}{R_0} \tag{22}$$

Устройство работает следующим образом. Переключением пары токового 1_i и потенциального 10_i ключей на *i*-ый тензорезистор подается ток I с генератора тока 4 и снимается напряжение U_{i0}, которое через дифференциальный усилитель 12 подается на вход аналого-цифрового преобразователя 13 и в цифровой форме U_{i0}^* поступает на выход. Поскольку нас интересует напряжение U_i^*, которое было бы на датчике R_i при токозадающем резисторе 6 номиналом R_{i0}, а не R_0, то, выполняем коррекцию, учитывая, что замене R_0 на R_{i0} ток генератора и напряжение U_{i0}^* на датчике изменятся обратно пропорционально отношению $\frac{R_{i0}}{R_0}$ получим

$$U_i^* = U_{i0}^* \frac{R_0}{R_{i0}} = const \frac{R_i}{R_{i0}} \ . \tag{23}$$

Если в цепях тензорезисторов имеется термоэдс, то для её исключения опрос проводят на знакопеременном токе.

Структурная схема устройства измерения давления жидкости или газа с опросом тензорезисторов на знакопеременном токе представлена на рис. 2. Оно отличается от предложенного выше устройства тем, что в цепь постоянного тока на выходе генератора тока дополнительно вставлен мостиковый модулятор 15 сигнала опроса тензорезисторов, выход разнополярного сигнала с выходной диагонали которого подан на вход блока 1 тензорезисторов, а выход блока 1 дополнительно подан на мостиковый демодулятор 16, выходная диагональ которого подана на блок 11 формирования выходного информативного сигнала.

Блоки 15_1 и 16_1 предназначены для управления ключами модулятора 15 и демодулятора 16 соответственно. Работают модулятор и демодулятор традиционно. Для исключения возможной термоэдс необходимо сложить амплитуды четного числа (минимум двух) последовательных периодов модуляции сигнала. Это выполняется в цифровом виде при последующей обработке информативного сигнала U_{i0}^*.

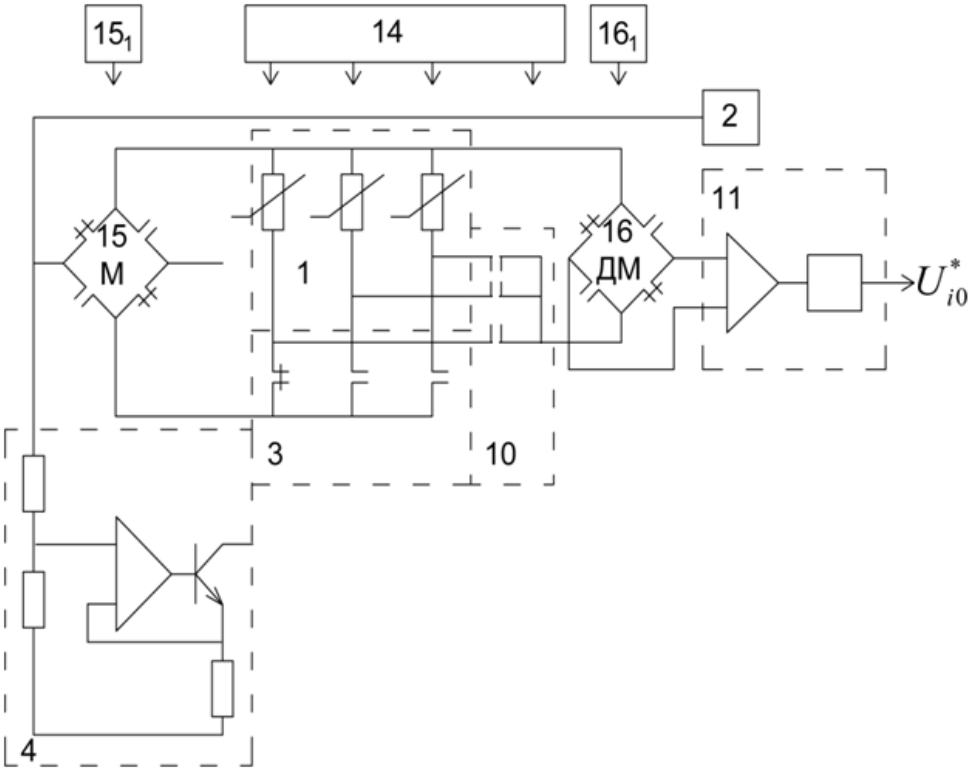


Рис. 2. Структурная схема устройства с опросом тензорезисторов на знакопеременном токе
Fig. 2. Structural diagram of a device with interrogation of strain gauges on alternating current

Заключение. Таким образом предложенный метод измерения давления жидкости и устройства для его осуществления повышают точность за счет уменьшения погрешности нелинейности тензорезисторов и влияния температуры и упрощают реализацию за счет возможности неточного их изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Левашов Д.Е.* Датчики и измерители гидростатического давления // Техника экспедиционных исследований: Инструментальные методы и технические средства оценки промыслово-значимых факторов среды. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. С. 51–67.

2. *Степанюк И.А.* Океанологические измерительные преобразователи. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 272 с.

3. *Ваганов В.И.* Интегральное термопреобразование. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.

4. *Забурдаев В.И., Мишуров В.Ж., Кузьмин К.А., Алексеев А.П.* Результаты исследования индивидуальных метрологических характеристик датчиков давления типа "Сапфир". Сб. науч. тр. «Системы контроля окружающей среды» / Средства и информационные технологии // МГИ НАНУ. Севастополь. 2006. С. 60–69.

5. *Патент* RU 2145007. Опубл. 10.07.2020, Бюл. № 8. Мембранный датчик давления. Авторы Дьячков В.Н., Дьячков Н.В., Бирюнов К.И. и др.

6. *Патент* RU 2364847 C2. Опубл. 28.08.2009. Бюл. № 23. Способ определения давления жидкости или газа. Автор Любимский В.М.

7. *Стучебников В.М.* Тензорезисторные преобразователи на основе гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире». Измерение, контроль, автоматизация. № 4 (44), 1982. С. 15–26.

METHOD AND DEVICES WITH STRAIN GAUGERS FOR MEASUREMENT OF HYDROSTATIC PRESSURE

V.A. Gaisky

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

To improve the accuracy, the multichannel principle is used to construct invariant systems. A method for measuring pressure using several strain gauge sensors with different sensitivities approximated by polynomials of system *m* for pressure and system *n* for temperature, by formation of system of $(m+1)(n+1)-1$ linear algebraic equations from transformation functions, as products of polynomials with sensitivity coefficients and relative changes in resistances of strain gauges as free terms and the solution of the system with respect to the measured pressure is proposed. Variants of devices for polling strain gauges on direct and alternating current are considered.
Keywords: pressure, strain gauge, conversion functions.

REFERENCES

1. *Levashov D.E.* Datchiki i izmeriteli gidrostaticheskogo davleniya (Hydrostatic pressure sensors and meters). *Tekhnika ekspedicionnyh issledovanij: Instrumental'nye metody i tekhnicheskie sredstva ocenki promyslovo-znachimyh faktorov sredy*. Moscow: Izd-vo VNIRO, 2003, pp. 51–67.

2. *Stepanyuk I.A.* Okeanologicheskie izmeritel'nye preobrazovateli (Oceanological measuring transducers). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, 272 p.

3. *Vaganov V.I.* Integral'noe termopreobrazovanie (Integral thermal transformation). Moscow: Energoatomizdat, 1983, 136 p.

4. *Zaburdaev V.I., Mishurov V.ZH., Kuz'min K.A., and Alekseev A.P.* Rezul'taty issledova-niya individual'nyh metrologicheskih harakteristik datchikov davleniya tipa "Sapfir" (The results of the study of individual metrological characteristics of pressure sensors of the "Sapphire" type). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy.* Sevastopol, 2006, pp. 60–69.

5. *D'yachkov V.N., D'yachkov N.V., and Biryunov K.I.* Membrannyj datchik davleniya (Membrane pressure sensor); Pat. 2145007. Rossiya, opubl. 10.07.2020, byul. № 8.

6. *Lyubimskij V.M.* Sposob opredeleniya davleniya zhidkosti ili gaza (Method for determining the pressure of a liquid or gas). Pat. 2364847 S2. Rossiya, opubl. 28.08.2009, Byul. № 23.

7. *Stuchebnikov V.M.* Tenzorezistornye preobrazovateli na osnove geteroepitaksial'nyh struktur «kremnij na sapfire». Izmerenie, kontrol', avtomatizaciya, (Strain gauge transducers based on heteroepitaxial structures "silicon on sapphire". Measurement, control, automation). 1982, No. 4 (44), pp. 15–26.

УДК 629.12.03:628.33 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-46-50

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ОЧИЩЕННОЙ ВОДЕ

В.И. Истомин[1], А.Г. Клименко[1], С.Е. Тверская[2], В.В. Хлебникова[2]

[1] Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: v-istomina@mail.ru
[2] ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

В результате проведенного анализа различных методов и приборов определения концентрации нефтепродуктов в очищенной воде судов установлено, что существующие методы и приборы не вполне удовлетворяют требованиям Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов МАРПОЛ 73/78. Существующие методы для определения концентрации в очищенной воде в потоке (то есть на выходе фильтрующего оборудования являются функцией не только концентрации нефтепродуктов в воде, но и физико-химических свойств самой воды (мутности, солености и т.д.)). В работе принят экспресс-метод, как наиболее эффективный и мобильный в судовых условиях.

Ключевые слова: нефтесодержащие воды, измерение концентрации нефтепродуктов в воде, пробоотборное устройство, экспресс метод контроля нефтепродуктов в воде.

Поступила в редакцию 17.04.2022. После доработки: 27.05.2022.

Введение. Значительное воздействие на морскую среду в мировом океане оказывают судовые энергетические установки. Наиболее интенсивное воздействие приходится на водную (загрязнение нефтью и продуктами ее переработки) и воздушную (выхлопные газы) среды.

Точное определение концентрации нефтепродуктов в воде является достаточно сложной задачей, т. к. мы имеем дело с многокомпонентными фракциями веществ.

Определение содержания нефтепродуктов в воде и уровня их концентрации осуществляется несколькими методами. В основе всех методик лежит экстракция компонентов нефти из исследуемой пробы с помощью различных веществ, а затем определение количества углеводородных соединений. К таким методам относят: метод инфракрасной спектрофотометрии; гравиметрический метод; флуориметрический метод и метод газовой хроматографии.

Среди химико-аналитических методов определения содержания нефтепродуктов в воде наиболее эффективными и распространенными можно выделить два метода – это метод инфракрасной спектрофотометрии и весовой (гравиметрический) [1–6], которые и будут рассмотрены ниже.

Метод инфракрасной спектрофотометрии основан на измерении интенсивности поглощения метиленовых и метильных групп в ближней инфракрасной области спектра 3200–2700 $см^{-1}$. Данные группы составляют основную массу нефти и продуктов ее переработки. Предварительно эти вещества экстрагируют из подсоленной до pH = 2 исследуемой пробы четыреххлористым углеродом.

Нефтесодержание определяется путем измерения оптической плотности экстракта и нанесения ее на калибровочный график. При этом, калибровочный график строят с помощью эталонного образца нефтепродукта или стандартного раствора, состоящего из декана (39%), изооктана (22%) и бензола (39%).

Оптическая плотность экстракта, полученная из анализируемой пробы, измеряется и рассчитывается с помощью инфракрасного двухлучевого сканирующего спектрометра типов ИКС-29, ИКС-31.

Содержание нефтепродуктов (мг/л) вычисляется по формуле

$$C = a \cdot N \cdot 1000/V,$$

где a – содержание нефти в 100 мл раствора пробы, мг; N – кратность разведения экстракта, если такое производилось; V – объем пробы, мл.

Содержание нефти в нефтесодержащих водах может также определяться в частях нефтепродуктов на миллион частей смеси (млн$^{-1}$, ppm). Погрешность измерения содержания нефтепродуктов данным методом не превышает 1%, диапазон измерений 0,1–1000 мг/л и выше.

Содержание нефти в нефтесодержащих водах определяют также весовым методом. Однако он менее точен. Этот метод допускается использовать временно до оснащения лабораторий инфракрасным спектрофотометром.

Анализ нефтесодержащих вод весовым методом рекомендуется проводить в течение первого часа, но не позднее 24 часов после отбора пробы. Извлечение нефтепродуктов при весовом методе производится дважды. Сначала извлекают и собирают летучие нефтепродукты, используя перегонный аппарат с ловушкой. Пробу нефтесодержащей воды нагревают до кипения, нагрев продолжают до тех пор, пока объем сконденсированных в ловушке нефтепродуктов не будет оставаться постоянным в течение 15 минут.

Извлечение оставшейся части нефтепродуктов из пробы производится путем ее экстракции четыреххлористым углеродом CCl_4. Полученный экстракт вновь нагревают для отгонки CCl_4.

Цель исследований. Для упрощения процесса измерения концентрации нефтепродуктов в очищенной воде, который является достаточно дорогостоящем, трудоемким и сложным при измерении концентрации нефтепродуктов, предлагается экспресс-метод для оценки содержания нефтепродуктов в очищенной воде, который не требует значительных затрат времени и средств и позволяет оперативно отсоединить концентрацию нефтепродуктов в очищенной воде в процессе работы фильтрующего оборудования и при экспериментальных исследованиях.

В судовых условиях контроль за работой фильтрующего оборудования по очистке нефтесодержащих вод осуществляется с помощью судовых комплексных лабораторий анализа воды (СКЛАВ).

Ниже приводится методика отбора проб и измерения концентрации нефтесодержащих вод. Отбор представительной пробы нефтесодержащих вод является одним из важнейших моментов экспериментальных исследований сепарационного оборудования. Сложность заключается в том, что нефтепродукты распределены неравномерно в объеме нефтеводяной эмульсии и могут находиться как в эмульгированном, так и в пленочном состоянии.

При отборе проб, в соответствии с требованиями международной организации ИМО и с учетом работ [2, 4, 7], должны выполняться следующие условия:

– отбор проб производят через устройство, конструкция которого приведена на рис. 1;

– места и точки отбора проб должны находиться на вертикальных участках трубопроводов;

– перед отбором пробы нефтеводяная эмульсия должна стекать через пробоотборное устройство не менее 1 минуты.

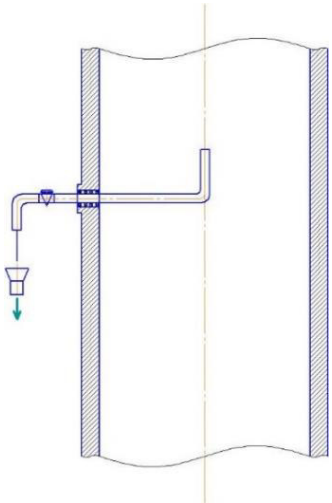


Рис. 1. Пробоотборное устройство
Fig. 1. Sampler

Измерение концентрации нефтепродуктов в эмульсии производится экспресс-методом [2, 7] с помощью прибора ПКН-1р и методом химического анализа [1, 6]. Метод химического анализа заключается в том, что в исследуемой пробе производится экстрагирование нефтепродуктов гексаном или другим растворителем с последующей возгонкой и взвешиванием остатка. Как было отмечено выше, метод отличается сложностью, трудоемкостью и значительными затратами времени для проведения единичного анализа пробы. В связи с изложенным, в настоящем исследовании приоритет получил экспресс-метод, использование которого, помимо низких затрат времени при проведении анализа, не оказывает влияния на точность измерений по сравнению с методом химического анализа.

Отбор проб для экспресс-метода осуществляется в специально изготовленные пробирки (рис. 2) емкостью 45 мл. Для химического анализа пробы отбирались в чистые бутылки с узким горлышком емкостью не менее 1 л каждая в соответствии с методикой, изложенной в работах [1, 5, 6].

Пробы нефтеводяной эмульсии отбирают после достижения установившегося режима работы сепарационного оборудования. Установившимся режимом считается такой, который устанавливается после прокачки через оборудование объема нефтеводяной эмульсии, не менее, чем в два раза превышающего объем оборудования [2, 6].

Отбор проб при установившемся режиме осуществляется одновременно на входе и на выходе в условиях максимально приближенных к «изокинетическим», при которых скорость входа жидкости в пробоотборном устройстве должна быть равна скорости основного потока в трубопроводе [2, 6, 7].

Для повышения точности эксперимента и возможности статистической обработки данных в каждой точке плана отбирается несколько проб, на основании которых рассчитываются усредненные значения концентрации нефтепродуктов [2].

Для изменения концентрации нефтепродуктов в судовых нефтесодержащих водах наибольшее распространение получил метод химического анализа, заключающийся в эсктрагировании нефтепродуктов, содержащихся в исследуемой пробе гексаном или другим легким растворителем, последующей его возгонке и взвешивании выделенного остатка [1, 6]. Однако этот метод достаточно сложен, трудоемок и требует значительных затрат времени для анализа единичной пробы. Поэтому предлагается использовать экспресс-метод [2, 7] для измерения концентрации нефтепродуктов в нефтесодержащих водах с помощью прибора ПКН-1р, позволяющий упростить и значительно ускорить анализ исследуемых проб, без снижения точности измерения.

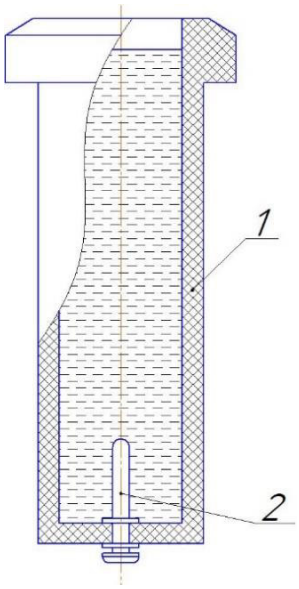


Рис. 2. Измерительная пробирка.
1 – корпус; 2 – электрод
Fig. 2. Measuring tube.
1 – housing; 2 – electrode

Экспресс-метод измерения концентрации нефтепродуктов в воде заключается в определении емкости конденсатора с переменной толщиной диэлектрика, в качестве которого используется пленка нефтепродукта с известной диэлектриче-

ской проницаемостью. Нефтепродукт из объема пробы вытесняется на поверхность посредством центрифугирования. Принципиальная схема прибора ПКН-1р (рис. 3) [2, 7] состоит из измерительного сосуда 1, выполненного из диэлектрика, электродов 2, 3, образующих обкладки измеряемого конденсатора и моста переменного тока 5, служащего для измерения емкости.

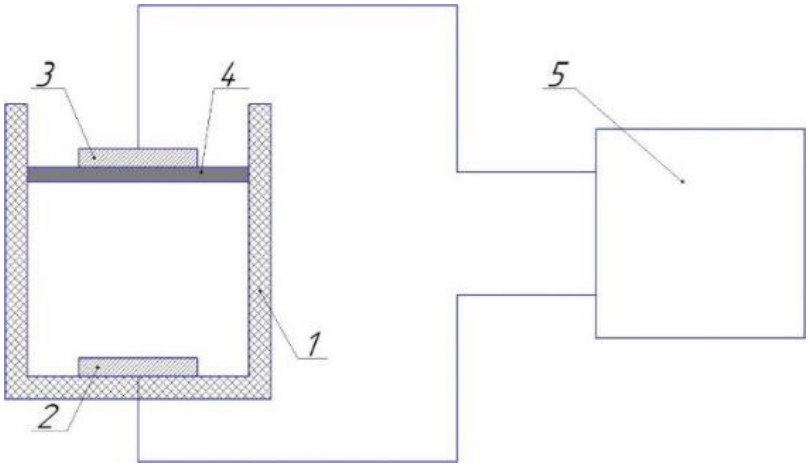


Рис. 3. Принципиальная схема прибора ПКН-1р для измерения концентрации нефтепродуктов: 1 – измерительный сосуд; 2, 3 – электроды; 4 – пленка нефтепродукта; 5 – мост переменного тока
Fig. 3. Schematic diagram of the PKN1r-SPI device for measuring the concentration of petroleum products: 1 – measuring vessel; 2, 3 – electrodes; 4 – oil product film; 5 – AC bridge

Заключение. В результате проведенного анализа различных методов и приборов определения концентрации нефтепродуктов в очищенной воде судов установлено, что существующие методы и приборы не вполне удовлетворяют требованиям Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов МАРПОЛ 73/78.

В существующих методах характеристики концентрации нефтепродуктов на выходе фильтрующего оборудования являются также функцией физико-химических свойств самой воды (мутности, солености и т.д.).

В судовых условиях наиболее целесообразно использовать экспресс-метод определения концентрации нефтепродуктов с использованием прибора ПКН-1р. Преимущества метода заключаются в простоте измерений, низких затратах времени при проведении анализа и обеспечении удовлетворительной точности измерений в сравнении с другими известными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубрилов С.П.* Охрана окружающей среды при эксплуатации судов. Л.: Судостроение, 1989. 256 с.

2. *Истомин В.И.* Комплексная очистка судовых нефтесодержащих вод. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2004. 202 с.

3. *Касилов Ю.И.* Научные основы и принципы организации мониторинга загрязнения морской среды // Современное судоходство и морское образование: материалы междунар. научн.-техн. конф. Одесса: ОНМА, 2004. С. 36–37.

4. *Международная* конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года и Протокол 1978 года. М.: Изд-во ЦРИА «Морфлот», 2013. 761 с.

5. *Сигнализаторы* нефтепродуктов в нефтесодержащих водах судов и технологических водах предприятий типа «Флюорат-411». Паспорт. 411.00.00.00 ПС. Люмекс. 1998. 35 с.

6. *Средства* очистки жидкостей на судах: справочник / под общ. ред. И.А. Иванова. Л.: Судостроение, 1984. 272 с.

7. *Истомин В.И., Хапаев В.М.* Разделение нефтеводяных эмульсий в отстойниках с гранулированным наполнителем // Химия и технология топлив и масел. 1986. № 3. С. 15–16.

IMPROVEMENT OF METHODS AND DEVICES FOR MONITORING THE CONCENTRATION OF PETROLEUM PRODUCTS IN PURIFIED WATER

V.I. Istomin[1], A.G. Klimenko[1], S.E. Tverskaya[2], V.V. Khlebnikova[2]

[1]Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28
[2]Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

As a result of the analysis of various methods and devices for determining the concentration of oil products in the purified water of ships, it was found that the existing methods and devices do not fully meet the requirements of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships MARPOL 73/78.Existing methods for determining the concentration in purified water in a stream (that is, at the outlet of filtering equipment are a function not only of the concentration of oil products in water, but also of the physicochemical properties of the water itself (turbidity, salinity, etc.)). The work adopted an express method as the most effective and mobile in ship conditions.

Keywords: oily waters, measurement of the concentration of oil products in water, sampling device, express method for monitoring oil products in water.

REFERENCES

1. *Zubrilov S.P.* Ohrana okruzhayushchej sredy pri ekspluatacii sudov (Environmental protection during the operation of vessels). Leningrad: Sudostroenie, 1989, 256 p.

2. *Istomin V. I.* Kompleksnaja ochistka sudovyh neftesoderzhashhih vod (Integrated treatment of marine oily waters). Sevastopol: SevNTU, 2004, 202 p.

3. *Kasilov Ju.I.* Nauchnye osnovy i principy organizacii monitoringa zagrjaznenija morskoj sredy. Sovremennoe sudohodstvo i morskoe obrazovanie (Scientific Basis and Principles for Marine Pollution Monitoring). Modern Shipping and Maritime Education, materials of the international scientific and technical conference, Odessa: ONMA, 2004, pp. 36-37.

4. Mezhdunarodnaja konvencija po predotvrashheniju zagrjaznenija s sudov 1973 goda i Protokol 1978 goda (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 and Protocol, 1978), Moscow: CRIA “Morflot”, 2013, 761 p.

5. Signalizatory nefteproduktov v neftesoderzhashhih vodah sudov i tehnologicheskih vodah predprijatij tipa “Fljuorat-411” (Oil product alarms in oily waters of vessels and process waters of “Fluorat-411” type enterprises). Pasport. 411.00.00.00 PS. Ljumeks, 1998, 35 p.

6. *Ivanova I.A.* Sredstva ochistki zhidkostej na sudah (Means of cleaning liquids on ships), Leningrad: Sudostroenie, 1984, 272 p.

7. *Hapaev V.M. and Istomin V.I.* Razdelenie neftevodjanyh jemul'sij v otstojnikah s granulirovannym napolnitelem (Separation of oil-water emulsions in granular filled sedimentation tanks). *Himija i tehnologija topliv i masel*, 1986, No. 3, pp.15–16.

УДК 532.5:504.06 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-51-60

СОВРЕМЕННЫЕ ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ АКТИВИЗАЦИИ МАССООБМЕНА В ВОДНОЙ СРЕДЕ

А.Е. Щодро[1], С.А. Шоларь[1,2]

[1]Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: alexeugn@yandex.ru
[2]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: sa.sholar@mail.ru

В статье рассмотрены схемы некоторых типов экологических сооружений, управляющих структурой водного потока, способствующих насыщению его кислородом, увеличивающих скорости поперечного переноса массы воды и активизирующих массообмен в целом. Указанные сооружения способствуют промыву застойных зон в реках, морских заливах и водохранилищах, уменьшают начальные концентрации вредных веществ, выбрасываемых в естественные водоёмы. Приводятся также соображения по возможности изменений параметров указанных сооружений для увеличения их эффективности.

Ключевые слова: экологические сооружения, наносы, заиливание, устья рек, гидротехника, проектирование, перенос наносов.

Поступила в редакцию: 15.04.2022. После доработки: 30.05.2022.

Введение. Основные экологические проблемы в районах впадения малых рек в море, в самых малых и средних реках, а также при устройстве канализационных выпусков в промышленных и городских регионах, при выпуске перегретых вод из тепловых и атомных электростанций в пруды и водохранилища – охладители, решаются с помощью устройства ряда специальных сооружений, которые рассмотрим по группам:

- буны и полузапруды (пассивные и активные сооружения);
- донные пороги, устраиваемые при выпуске сточных вод в моря и водохранилища;
- донные пороги-завихрители, рассеивающие входящие массы воды по значительному объёму акватории;
- водовыпускные сооружения в широкие акватории и каналы.

Целью настоящей работы следует считать обобщение принципов проектирования экологических сооружений и информационное их внедрение.

Свойством, объединяющим эти сооружения, является образование винтообразных течений с вертикальными, наклонными или горизонтальными осями, которые выполняют основные экологические функции этих сооружений. Экологическое состояние средних и малых рек во всех природных зонах вызывает сегодня большую тревогу, многие из них исчезли с карты нашей страны. Загрязнения речных экосистем приводят к их деградации, поэтому проблема сохранения и оздоровления малых и средних рек является одной из самых острых.

1. Буны и полузапруды. Эти сооружения, именуемые в морской практике бунами, в речной же чаще – полузапрудами, служат для накопления наносного материала возле пляжей, для направления движения наносов, их аккумуляции в пространствах между соседними сооружениями, предотвращения берега от размыва и других задач. Экологический аспект при этом присутствует автоматически, поскольку любые сооружения такого типа возмущают поток, насыщая его кислородом, замедляя скорости движения транзитного потока, создают условия для отдыха гидробионтов, создают места для нерестилищ и оказывают другие благоприятные действия. Полузапруды бывают глухими, не допус-

кающими перелива потока через их гребень, затапливаемыми, которые рассматриваются обычно в двух вариантах – пассивных и активных. Пассивные практически не вызывают вторичных течений в потоке, кроме местных явлений, которые связаны с их обтеканием. Активные же создают циркуляционные течения во всей массе потока, поскольку располагаются под углом к направлению основного потока, по течению или против. Отдельно выделяются также сквозные полузапруды, которые также могут выступать в роли активных или пассивных сооружений; активные при этом вызывают циркуляционные течения благоприятной структуры. Косо расположенные сквозные активные полузапруды (относительно набегающего потока) вызывают ряд полезных гидравлических эффектов – возникновение циркуляции в потоке и местного интенсивного винтообразного течения.

Рассмотрим применение низких затапливаемых полузапруд как сооружений, дешевых и технологичных [1–6], которые интенсифицируют вторичные течения и массообмен во всем потоке и активно способствуют переносу наносов к берегу и повышению самоочищающейся способности рек. Актуальной также является проблема местного размыва берегов рек. Именно паводки, которые в горных регионах все учащаются, приносят огромные ущербы. Размывы являются причиной разрушения большинства объектов берегоукрепления и других сооружений [7–10]. При направлении полузапруд под углом против потока (рис. 1–3) наносы двигаются к берегу и, откладываясь у него, защищают его от размыва. При противоположном направлении, по потоку, – активнее проявляются водосмесительные свойства сооружения (рис. 2, 4).

Полузапруды, буны, донные пороги, струенаправляющие щиты, шпоры и другие аналогичные сооружения широко используются в гидротехнической практике. Сооружения такого типа используются как для защиты берегов от размыва, так и для повышения лесосплавных возможностей рек, для нужд судоходства и регулирования движения наносов, а также и в некоторых других случаях.

Экологические аспекты применения такого типа сооружений также решают следующие важные задачи:

- начального разбавления сточных вод при их выпуске в водоток;
- аэрации потока;
- регулирования движения донных и взвешенных наносов;
- локального и систематического сжатия потока;
- защиты русла от размывов и его стабилизация;
- увеличение проточности реки и др.

Благодаря массообмену в водотоке происходит его дестратификация, аэрация, усиливается разбавление растворенных и взвешенных веществ, выравниваются температурные поля, ускоряется разложение загрязняющих веществ за счет окислительно-восстановительных реакций, переносятся питательные вещества и кислород к живым организмам и отводятся от них продукты жизнедеятельности.

В соответствии с целью исследований, сформулированной выше, основными задачами экспериментальной части стало исследование закономерностей формирования структуры потока за косорасположенной полузапрудой и оценка характера массообменных процессов.

Экспериментальные исследования проводились в зеркальном лотке на неразмываемой модели. Масштаб модели составлял примерно 1:30. Уровни воды измерялись с помощью шпиценмасштаба. Скорости измерялись микровертушкой Х-6. Проводилась фото и видео съемка. Траектории донных и поверхностных струй исследовались с помощью поверхностных и донных полистирольных поплавков и фиксировались зарисовками в журнале исследований. Отдельные массообменные характеристики (ширина факела рассеивания – потока, который выходит из вальцевой зоны в транзитный поток, и расстояние оси этого потока от берега) исследовались путем введения в поток красителя (водного раствора метиленового синего).

Методика экспериментальных исследований основана на теории гидравлического моделирования по Фруду. Числа Фруда были значительно меньше 1, скорости потока всегда были такими, которые обеспечивали автомодельный режим по числу Рейнольдса по вязкости. В лотке прямоугольного поперечного сечения были установлены полузапруды длиной, обеспечивающей ограниченное сжатие потока (не более 0,3), и при этом, влияние противоположной стенки лотка на явления у полузапруды не проявлялось.

Экспериментальная часть состояла из трех блоков исследований.

В первом блоке были проведены методические исследования. Выявлен характер общего хода гидродинамических процессов. В ходе методических исследований предварительно оценена эффективность применения берегового отверстия, используемого только в случае водосмесительных полузапруд, устанавливаемых по потоку и стенки препятствия. На основе анализа результатов предыдущих исследований определены основные параметры и характеристики, требующие детального изучения (рис. 1).



Рис. 1. Исследования системы бун, предназначенных для улучшения экологического состояния акватории
Fig. 1. Studies of a system of buns designed to improve the ecological state of the water area

Задачей второго блока исследований было установление рациональных параметров берегового отверстия и расстояния до боковой преграды за сооружением, а также была установлена оптимальная высота и угол планового расположения полузапруды. За определяющую характеристику была принята осредненная скорость вдоль гребня модели сооружения. На основе полученных результатов были построены графики зависимостей, позволяющие установить оптимальные параметры приведенных элементов для конкретных условий.

Третий блок исследований включал: исследование вспомогательных устройств; оптимизацию выбранной системы нескольких полузапруд с принятыми дополнительными конструктивными элементами. Результаты предыдущих экспериментальных исследований позволили нам выбрать параметр оптимизации и установить его основные параметры.

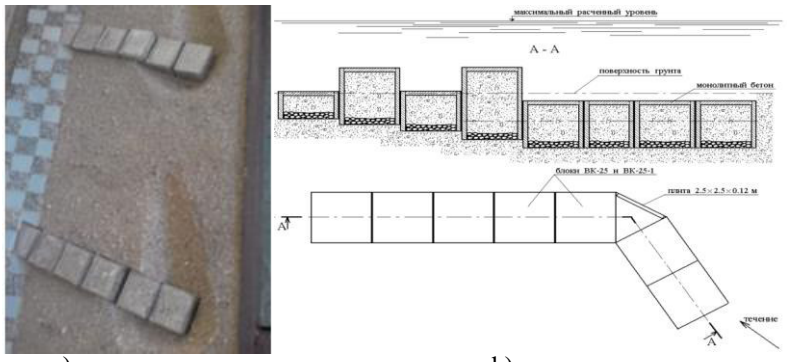
Рекомендации по внедрению. На основе результатов исследования мы даем рекомендации по использованию водосмесительных полузапруд для решения задач экологического характера. Возможность управления эффективностью сооружения и скоростями за ним при заданной его высоте связана с возможностью изменения ширины зазора между берегом и краем сооружения и углом его расположения относительно транзитного потока (эти параметры выбираются при проектировании). Оперативное регулирование скоростей и изменение эффективности может достигаться путем специальных устройств, изменяющих пропускную способность отверстия на входе в сооружение. И это есть вопрос рационализации конструкции.

Наши рекомендации позволяют определить принципиальные параметры низких затапливаемых полузапруд и дополнительных устройств, которые улучшают массообмен. В случае, когда параметры сооружения выходят за пределы диапазона экспериментальных исследований, проведенных нами, предлагается простая схема для выполнения гидравличного расчета. Расчеты дают значения скоростей и расходов поперечных течений за полузапрудой, определяется также величина зоны циркуляции за сооружением, которая позволяет определить расстояние между полузапрудами для различных случаев.

Водосмесительные полузапруды также можно успешно использовать для разных целей, а именно: общей интенсификации массообмена в речном потоке, ликвидации застойных зон, борьбы с цветением и зарастанием водотоков, постепенного разбавления сточных вод, рассеивания загрязненных стоков за мостовыми переходами. Такие сооружения могут устанавливаться на отдельных участках в пределах населенных пунктов, окультуренных зон, или применяться на большой длине конкретного речного русла (нескольких десятков километров). Также предлагается использовать затапливаемые полузапруды для усиления циркуляции водных масс и окисления загрязнений в аэротенках.

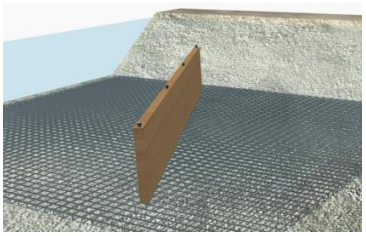
В рекомендациях использованы результаты лабораторных исследований, основные выводы из работ И.И. Кириенко, А.Е. Щодро, Л.А. Шинккаруком [3, 9] и расчеты К.И. Росинского [7].

С учетом современных тенденций в гидротехническом строительстве для решения поставленных задач нами предлагаются оригинальные типы конструкций с использованием простых и дешевых материалов (рис. 2, 3).

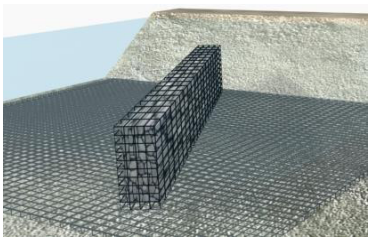


a) b)

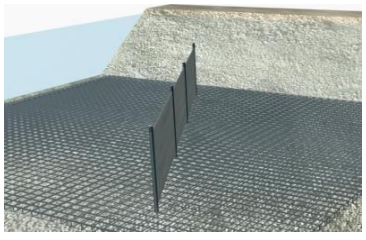
Рис. 2. Низкие затапливаемые (a) и сквозные (b) полузапруды, выполненные из отдельных железобетонных блоков, загружаемых местным грунтом (камнем) [2], предназначенные для защиты берега от размыва и экологических целей
Направление движения на рис. (a) от смотрящего, на рис. (b) – указано стрелкой
Fig. 2. Low flooded (a) and permeable (b) semi-dams, made of individual reinforced concrete blocks loaded with local soil (stone) [2], designed to protect the shore from erosion and environmental purposes.
The direction of movement in fig. (a) from the viewer, in fig. (b) – indicated by an arrow



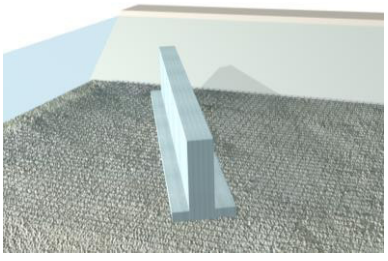
a) Полузапруды из деревянных щитов



b) Полузапруды из габионов



c) Полузапруды из геотекстиля



d) Полузапруды из бетонных блоков

Рис. 3. Схемы облегченных конструкций водосмесительных полузапруд
Fig. 3. Schemes of lightweight structures of water-mixing semi-dams (groins)

Данные конструкции достаточно просты, не требуют значительных капиталовложений при строительстве, являются эффективными и удобными в эксплуатации. Для устройства водосмесительных полузапруд можно использовать следующие облегченные конструкции:

- водосмесительная полузапруда из бетонных блоков;
- полузапруды из габионов;
- полузапруды из железнодорожных шпал;
- полузапруды из полиэтиленовых мешков с песчаными наполнителями;
- полузапруды из армированного брезента;
- полузапруды из полиэтиленовых труб;
- полузапруды из деревянных щитов.

Использование данных устройств (рис. 3) предварительно апробировано в лабораторных условиях и может быть эффективно использовано как для решения задач экологического характера, так и задач смежных направлений.

На рис. 4 и 5 показаны сооружения, построенные в натурных условиях с хорошими результатами их эксплуатации.

2. Донные пороги, устраиваемые при выпуске сточных вод в моря и водохранилища. На рис. 6 показано плановое расположение донных порогов (a), расположенных за выходом потока в водохранилище; (b) – пространственное изображение схемы истекания потока и его взаимодействия с донными порогами.

Донные струи при этом отклоняются вдоль порогов, а поверхностные – в противоположную сторону, образуя компенсационное течение; то есть, в целом в потоке возникает стационарное циркуляционное течение, усиливающее массообмен.

На рис. 7 изображена установка низкого криволинейного порога под острым, небольшим углом к направлению движения транзитного потока в русле реки на его излучение у вогнутого берега. Указанный порог практически полностью устраняет циркуляционное течение на излучение реки и уменьшает интенсивность размыва вогнутого берега, а также служит экологическим целям. На рис. 7 показаны различные схемы возможного расположения донных порогов и струенаправляющих устройств как для решения экологических задач, так и для задач регулирования русла.



a) b)

Рис. 4. Система полузапруд (a) и одиночная полузапруда (b) в натурных условиях; видно занесение наносами межполузапрудных пространств и хорошее закрепление берега возле одиночной полузапруды. Направление движения потока: (a) к наблюдателю, (b) – справа налево

Fig. 4. Semi-dam system (a) and single dam (b) in natural conditions; we can see the sedimentation of the intersemi-dam spaces and the good fixation of the shore near a single semi-dam. Flow direction: (a) towards the observer, (b) from right to left

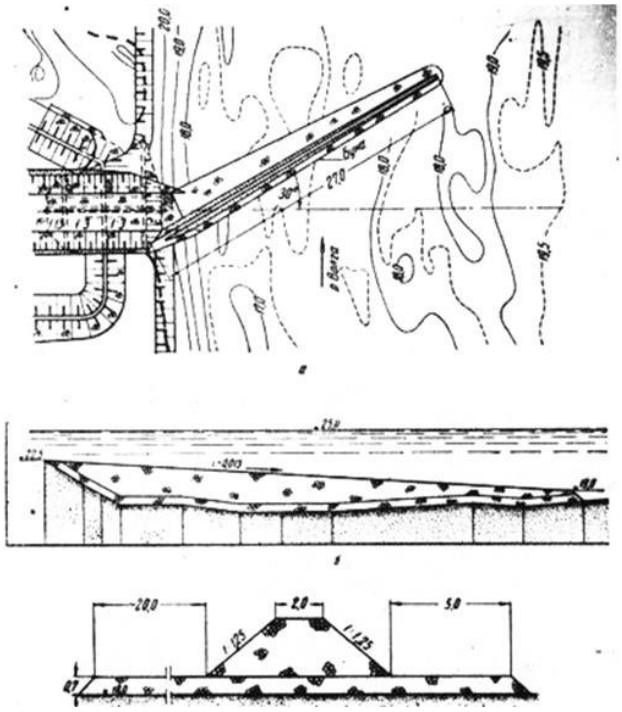


Рис. 5. Полузапруда, построенная на р. Волге для смешения сточных вод с речным потоком; эксплуатируется более 30 лет; результаты эксплуатации удовлетворительные
Fig. 5. A semi-dam built on the Volga River to mix sewage with river flow; operated for over 30 years; operating results are satisfactory

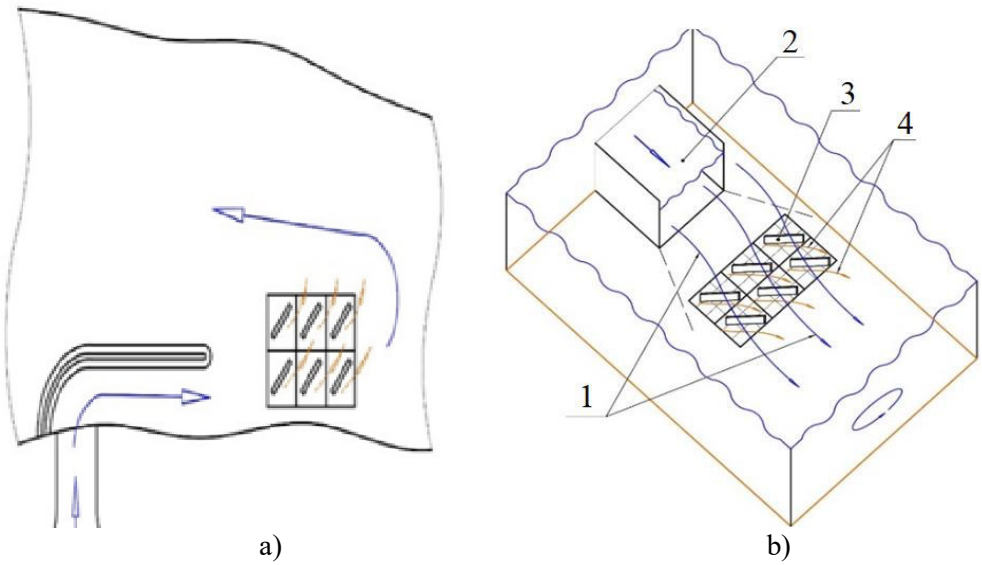


Рис. 6. Плановое расположение донных порогов. Где (а) – пороги расположенные за выходом потока в водохранилище; (б) – пространственное изображение схемы движения потока и его взаимодействие с донными порогами, где 1 – траектория поверхностных потоков, 2 – выход сбросного потока в водохранилище, 3 – донные пороги направления потока, 4 – траектория придонных потоков
Fig. 6. Planned arrangement of bottom rapids. Where (a) – rapids are located behind the outlet of the flow into the reservoir; (b) – spatial image of the flow pattern and its interaction with bottom rapids, where: 1 – the trajectory of surface flows, 2 – the exit of the waste flow into the reservoir, 3 – the bottom thresholds, 4 – the trajectory of near-bottom flows



Рис. 7. Низкий криволинейный порог, установленный под острым углом против течения. Течение потока от наблюдателя. Гидравлическая модель масштаба 1/30
Fig. 7. Low curvilinear threshold set at a sharp angle against the current. The scale of the hydraulic model is 1/30

3. Донные пороги-завихрители, рассеивающие входящие массы воды по значительному объёму акватории. Данный порог-завихритель, показанный на рис. 8, работает следующим образом. Струя со значительными скоростями, выходящая в водобойный колодец, находящийся ниже уровня дна и ограниченный криволинейными стенками, натекает на острый угол возле которого она раздваивается и образуется при этом два винта – правосторонний и левосторонний, которые вращаясь и поднимаясь по пандусу захватывают массы воды, окружающие конструкцию, и транспортируют поток, входящий в акваторию, в его верхние слои. Такая конструкция хорошо работает при глубинах потока не менее планового поперечного размера самого водобойного колодца. Размывы близи водогрейного колодца практически равны нулю, а характеристики смешения отличные.

Конструкции данного типа разработаны и проверены экспериментально в двух вариантах: двухстороннего симметричного водобойного колодца (смотри рис. 9) и одностороннего несимметричного («половина» конструкции, изображенной на рис. 9).

4. Водовыпускные сооружения в широкие акватории и каналы. Сооружение этого типа также разработаны и проверены опытно в условиях гидравлического эксперимента, в лотках с достаточно обоснованными параметрами.

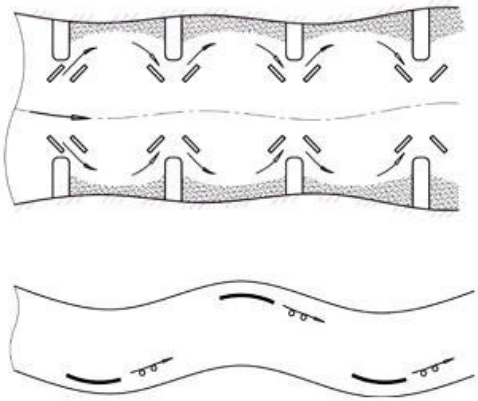


Рис. 8. Возможные схемы расположения криволинейных и прямолинейных донных порогов для борьбы с размывами и предотвращения заиления межполузапрудных пространств
Fig. 8. Possible layouts of curvilinear and rectilinear bottom rapids to combat erosion and prevent silting intersemi-dammed spaces

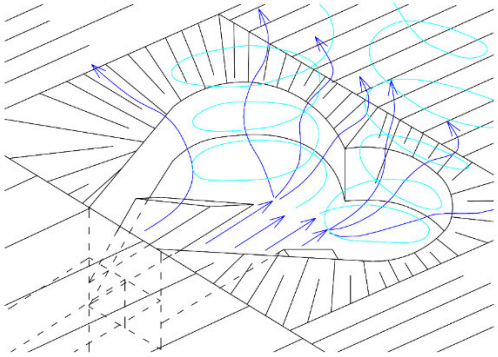


Рис. 9. Донный завихритель двухстороннего (симметричного) типа [11]
Fig. 9. Bottom swirler of double-sided (symmetrical) type [11]

Схема сооружения показана на рис. 10. Сооружение работает следующим образом. Вытекающая из бокового резервуара или какого-либо источника высокоскоростная струя распространяется в потоке или в стоячей воде более широкой акватории. Такое вытекание

при этом может привести к нежелательным экологическим последствиям и к размыву дна и берегов вокруг сооружения. На выходе из сооружения струя движется над донным уступом, который рассчитан таким образом, чтобы струя взаимодействовала с отрывным течением, возникающим за уступом, и при этом расширялась в максимальной степени.

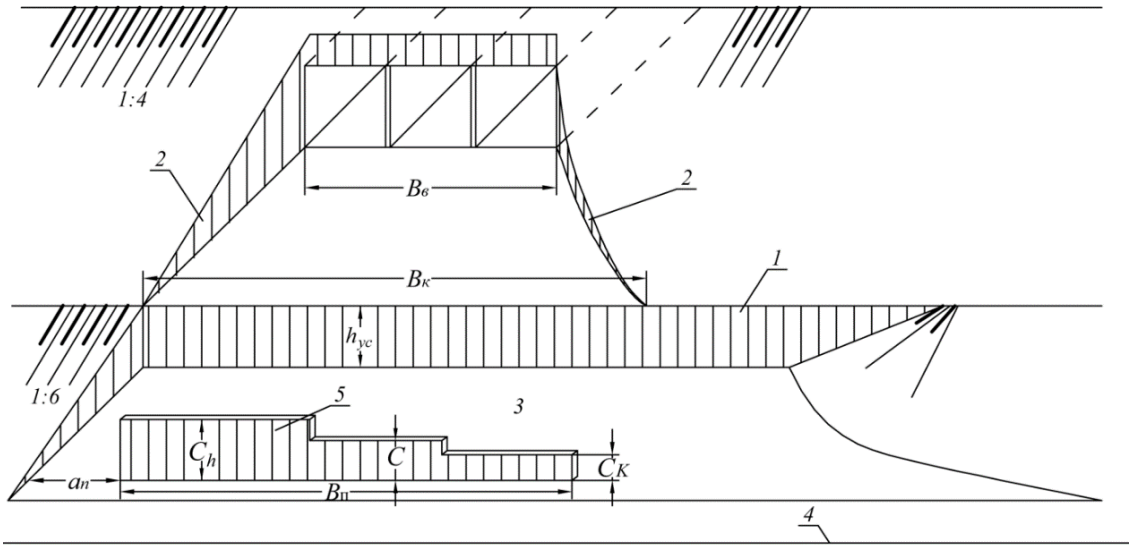


Рис. 10. Схема водовыпуска в канал, реку, водохранилище или в море [12]. Использованы конструктивные элементы: донный уступ (1), криволинейная (ныряющая) направляющая стенка (2), жесткое (облегченное) крепление (3), гибкое крепление (4), донный струенаправляющий порог (5)
Fig. 10. Scheme of water outlet into a canal, river, reservoir or sea [12]. Structural elements used: bottom ledge (1), curved (diving) guide wall (2), rigid (lightweight) fastening (3), flexible fastening (4), bottom jet sill (5)

Той же цели служит также и донный порог, расположенный несколько ниже по течению струи от донного уступа; за ним также возникает винтообразное течение, которое «растягивает» струю и заставляет её вытекать равномерно по ширине уступа, не образуя водоворота воды за выпуском, и обеспечивая максимально плавное сопряжение потоков текущего со струей и транзитного, идущего в канале или в реке. Потоки при этом максимально плавно сопрягаются, обеспечивая равномерное распределение примесей и плавное уменьшение их значений по ходу струи.

Заключение. Все рассмотренные сооружения реально исполняемы на водохозяйственных объектах любого региона. При этом полузапруды (буны) наиболее применимы для горно- предгорной зоны, а все остальные типы сооружений имеют универсальную применимость. Хорошие показатели их технической эффективности отражены в приводимых литературных источниках, на которые сделаны ссылки в статье. Теоретические и расчётные вопросы изложены в работах [4, 9, 10, 12]; практические аспекты проектирования рассмотренных сооружений соответственно – в работах [1–7, 9–14].

Авторы выражают благодарность д.г.н., профессору Воскресенской Е.Н. за ценные замечания и советы при работе над данной статьей.

Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС №0012-2021-0007 и №0012-2021-0010

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Щодро А.Е., Мокляк Н.Н.* Способ интенсификации водообмена в акватории и управления движением наносов и устройство для его осуществления: патент 2711810, Рос. Федерация. Заявл. 01.10.2018; опубл. 22.01.2020, Бюл. № 3. 17 с.

2. *Кириенко И.И., Щодро А.Е., Шуминский В.Д.* Берегозащитное сооружение: а.с. 971986, СССР. Заявл. 10.07.1981; опубл. 11.07.1982, Бюл. № 41. 3 с.

3. *Кириенко И.И., Щодро А.Е., Шуминский В.Д., Шиннарук Л.А.* Проектирование низких затапливаемых полузапруд // В кн.: Гидромелиорация и гидротехническое строительство. Львов: Высшая школа, 1981. С. 59–64.

4. *Щодро О.Є., Мокляк М.М., Ходневич Я.В*. Покращення екологічного стану малих річок за допомогою затоплюваних напівзагат // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. 2007. № 1 (37). С. 133–142.

5. *Мокляк М.М.* Застосування затоплюваних водозмішувальних напівзагат для інтенсифікації масообміну в потоці з метою покращення екологічного стану малих річок // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. 2006. № 4 (36). С. 143–148.

6. *Эдельштейн К.К., Сахарова М.И.* Восстановление и охрана малых рек: Теория и практика. М.: Агропромиздат, 1989. 314 с.

7. *Россинский К.И., Кузьмин И.А.* Решение уравнений диффузии применительно к задачам движения взвешенных наносов // Русловые процессы. 1958. С. 100–123.

8. *Журавлев М.М.* Местный размыв у опор мостов. М.: Транспорт, 1984. 243 с.

9. *Shchodro A.E.* River bed deformations near banks and hydraulic structures due to river flow River Basin Management IV: 4th International Conference on River Basin Management Including all Aspects of Hydrology, Ecology, Environmental Management, Flood Plains and Wetlands. Boston: WIT-Press, Southampton, 2007. P. 381–387.

10. *Shchodro A.E., Moklyak M.M.* Low flooded (submerged) groins as constructions activating mass transfer in rever flows // Scientific Bulletins «Civil Engineering Impact upon the Environment», 11-2014. P. 18–29.

11. *Gur'ev A.P., Shchodro A.E., Chumicheva M.M., Shlikhta V.M*. Kinematic characteristics of the flow of an intake structure with a curvilinear threshold // Hydrotechnical Construction. 1991. Vol. 22 (11). P. 652–655.

12. *Щодро А.Е., Шлихта В.М.* Экспериментальное и численное исследование структуры и размывающей способности потока у водовыпусков в каналы // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. 1999. Т. 2. № 36. С. 404–410.

13. *Щодро А.Е., Мокляк Н.Н.* Низкие затопленные полузапруды как сооружения для защиты берегов от размыва и улучшения экологического состояния водотока // Гидроинженерия. 2013. № 1 (15). С. 20–35.

14. *Кинематические* характеристики потока впускного сооружения с криволинейным порогом / А.П. Гурьев, А.Е. Щодро, М.М. Чумичева, В.М. Шлихта // Гидротехническое строительство. 1991. № 4. С. 17–19.

MODERN HYDROECOLOGICAL FACILITIES FOR ACTIVATION OF MASS TRANSFER IN AQUATIC ENVIRONMENT

A.E. Shchodro[1], S.A. Sholar[1,2]

[1]Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28
[2]Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The article presents schemes of some types of environmental structure types that control the features of water flow, contribute to its saturation with oxygen, increase the rate of transverse water mass transfer

and activate mass transfer in general. These facilities contribute to the washing of stagnant zones in rivers, sea bays and reservoirs, reduce the initial concentrations of harmful substances released into natural water reservoirs. Consideration is also given on the possibility of changing the parameters of these structures to increase their efficiency.
Keywords: environmental structures, sedimentation, siltation, river mouths, hydraulic engineering, design, sediment transport.

REFERENCES

1. *Shchodro A.E. and Moklyak N.N.* Sposob intensifikacii vodoobmena v akvatorii i upravleniya dvizheniem nanosov i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya: pat. 2711810, Ros. Federaciya. Zayavl. 01.10.2018; opubl. 22.01.2020. Byul. No. 3, 17 p.

2. *Kirienko I.I., Shchodro A.E., and Spuminskij V.D*. Beregozashchitnoe sooruzhenie: a.s. 971986, USSR. Zayavl. 10.07.1981; opubl. 11.07.1982. Byul. No. 41, 3 p.

3. *Kirienko I.I., Shchodro A.E., Shuminskij V.D., and Shinnaruk L.A.* Proektirovanie nizkih zataplivaemyh poluzaprud (Design of low flooded semi-dams). *Gidromelioraciya i gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 1981, No. 1, pp. 133–142.

4. *Shchodro A.E., Moklyak N.N., and Hodnevich Ya.V.* Pokrashchennya ekologichnogo stanu malih richok za dopomogoyu zatoplyuvanih napivzagat (Improving the ecological state of small rivers with the help of flooded semi-dams). *Visnik Nacional'nogo universitetu vodnogo gospodarstva ta prirodokoristuvannya,* 2007, No. 1 (37), pp. 133–142.

5. *Moklyak N.N.* Zastosuvannya zatoplyuvanih vodozmishuval'nih napivzagat dlya intensifikaciï masoobminu v potoci z metoyu pokrashchennya ekologichnogo stanu malih richok (The use of flooded water-mixing semi-dams for the intensification of mass transfer in the stream in order to improve the ecological state of small rivers). *Visnik Nacional'nogo universitetu vodnogo gospodarstva ta prirodokoristuvannya,* 2006, No. 4 (36), pp. 143–148.

6. *Edel'shtejn K.K. and Saharova M.I.* Vosstanovlenie i ohrana malyh rek: Teoriya i praktika (Restoration and protection of small rivers: Theory and practice), Moscow: Agropromizdat, 1989, 314 p.

7. *Rossinskij K.I. and Kuz'min I.A.* Reshenie uravnenij diffuzii primenitel'no k zadacham dvizheniya vzveshennyh nanosov (Solution of diffusion equations in relation to the problems of movement of suspended sediments). *Ruslovye processy,* 1958, No. 1, pp. 100–123.

8. *Zhuravlev M.M.* Mestnyj razmyv u opor mostov (Local erosion at bridge piers), Moscow: Transport, 1984, 243 p.

9. *Shchodro A.E.* River bed deformations near banks and hydraulic structures due to river flow River Basin Management. 4th International Conference on River Basin Management Including all Aspects of Hydrology, Ecology, Environmental Management, Flood Plains and Wetlands.- Boston: WIT-Press, Southampton, 2007, pp. 381–387.

10. *Shchodro A.E. and Moklyak N.N.* Low flooded (submerged) groins as constructions activating mass transfer in rever flows. *Scientific Bulletins «Civil Engineering Impact upon the Environment»*, 2014, No. 11, pp. 18–29.

11. *Gur'ev A.P., Shchodro A.E., Chumicheva M.M., and Shlikhta V.M*. Kinematic characteristics of the flow of an intake structure with a curvilinear threshold. *Hydrotechnical Construction*, 1991, № 22 (11), pp. 652–655.

12. *Shchodro A.E. and Shlikhta V.M*. Eksperimental'noe i chislennoe issledovanie struktury i razmyvayushchej sposobnosti potoka u vodovypuskov v kanaly (Experimental and numerical study of the structure and erosion capacity of the flow at water outlets into canals). *Bulletin of NTUU «KPI»,* 1999, Vol. 2, No. 36, pp. 404–410.

13. *Shchodro A.E. and Moklyak N.N.* Nizkie zatoplennye poluzaprudy kak sooruzheniya dlya zashchity beregov ot razmyva i uluchsheniya ekologicheskogo sostoyaniya vodotoka (Low flooded semi-dams as structures to protect the banks from erosion and improve the ecological state of the watercourse). *Gidroinzheneriya,* 2013, No. 1 (15), pp. 20–35.

14. *Gur'ev A.P., Shchodro A.E., Chumicheva M.M., and Shlikhta V.M*. Kinematicheskie harakteristiki potoka vpusknogo sooruzheniya s krivolinejnym porogom (Kinematic characteristics of the flow of an intake structure with a curvilinear threshold). *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 1991, № 4, pp. 17–19.

УДК 621.43.052 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-61-72

ПРАВОВЫЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ОСОБЕННОСТИ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А.Г. Клименко[1], В.А. Очеретяный[2]

[1]Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: kag1958776@gmail.com
[2]Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: ocheret-1961@rambler.ru

Исследованы основные источники вредных выбросов в сфере энергетики и транспорта, предложены основные мероприятия, направленные на снижение парникового эффекта с учетом особенностей географического положения РФ. Предложены меры, направленные на снижение вредных выбросов в сфере энергетики и транспорта с учетом требований последних законодательных актов, а также особенностей отечественного нефтегазового сектора. В сфере транспорта исследованы преимущества перевода двигателей внутреннего сгорания на газообразное топливо по сравнению с широким внедрением электротранспорта с учетом полного жизненного цикла от производства транспорта и добычи топлива до заправки.
Ключевые слова: сокращение выбросов, декарбонизация, энергетика, транспорт, низкоуглеродные технологии, двигатель внутреннего сгорания, газовый двигатель.

Поступила в редакцию: 10.05.2022.

Введение. Международное сообщество признает, что изменение климата Земли и его неблагоприятные последствия являются следствием антропогенной деятельности, в результате чего происходит увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере, что, в свою очередь, приводит к усилению парникового эффекта, влекущего за собой дополнительное потепление поверхности и атмосферы Земли и неблагоприятное воздействие на экосистемы.

Согласно [1] в 2020 г. глобальная средняя приземная температура воздуха на 1,2 (±0,1) °C превысила доиндустриальный уровень 1850–1900 гг.

Наблюдаемое в настоящее время и прогнозируемое в перспективе изменение климата сопряжено с повсеместными и необратимыми последствиями для антропогенных и естественных систем, а также несет риски обеспечения безопасности и устойчивого развития.

Решение проблем изменения климата по причине воздействия выбросов парниковых газов (водяной пар (H_2O), углекислый газ (CO_2), метан (CH_4), закись азота (N_2O), тропосферный озон (O_3)) должно быть тесно увязано как с географическим положением той или иной страны, так и особенностями ее геологической составляющей, и, как следствие, рациональным использованием этой составляющей.

В РФ в силу географического положения среднегодовая температура растет в 2,5 раза быстрее, чем по миру, а в Арктике – в четыре раза быстрее. Например, по оценкам Всемирного фонда дикой природы [2], к концу столетия ледники Кавказа и Дальнего Востока сократятся на 75%, Центральной Европы – на 80%, а Центральной Азии – на 50%.

Правовые аспекты декарбонизации энергетики и транспорта. Для стабилизации концентрации парниковых газов в атмосфере на таком уровне, который бы не допускал опасного антропогенного воздействия на климатическую систему, была принята так называемая Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата (заключена в г. Нью-Йорке 9 мая 1992 г.) (далее – РКИК ООН) [3], которая в

настоящее время является правовой основой международного взаимодействия по вопросам изменения климата.

В развитие Рамочной конвенции 11 декабря 2007 г. в г. Киото был принят Киотский протокол к Рамочной конвенции [4], обязывающий стороны Киотского протокола ограничить или сократить выбросы парниковых газов в первом периоде действия обязательств с 2008 по 2012 гг., а для сторон Дохийской поправки к Киотскому протоколу – во втором периоде, с 2013 по 2020 гг. Количественные обязательства участвующих государств по ограничению или сокращению выбросов парниковых газов были определены, относительно базового 1990 г.

РКИК ООН определила общие принципы и обязательства для сторон конвенции, а также внутреннюю политику в решении проблем изменения климата, а именно:

– необходимость учета выбросов и абсорбции парниковых газов сторонами Конвенции. Данные о зарегистрированных ежегодных выбросах и абсорбции парниковых газов должны периодически предоставляться в Секретариат РКИК в виде ежегодных отчетов об их инвентаризации.

– обязательства формулировать, осуществлять, публиковать и регулярно обновлять национальные программы по смягчению последствий изменения климата путем сокращения антропогенных и абсорбции парниковых газов, а также осуществлять меры по содействию адекватной адаптации к изменению климата;

– обязательства представлять на периодической основе общее описание принятых или предусмотренных мер по соблюдению конвенции.

Вместе с тем, РКИК ООН предусматривается применение важнейшего принципа общей, но дифференцированной ответственности, с учетом различных социально-экономических условий стран. Основную ответственность согласно РКИК ООН за антропогенные изменения климата несут промышленно развитые страны, поэтому им принадлежит ведущая роль в борьбе с изменением климата и его негативными последствиями.

На промышленно развитые страны и страны с переходной экономикой РКИК налагает дополнительные обязательства:

– каждая из указанных сторон конвенции должна проводить национальную политику и принимать соответствующие меры по смягчению последствий изменения климата путем ограничения своих антропогенных выбросов парниковых газов, защиты и повышения качества адсорбентов парниковых газов, демонстрируя, таким образом, лидерство в этой области для остальных стран;

– периодически представлять подробную информацию о своих политике и мерах, а также о прогнозируемых в связи с ними антропогенных выбросах из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов;

– развитые страны, обязаны предоставлять финансовую и иную помощь развивающимся странам для выполнения ими своих обязательств по конвенции, учитывая при этом их конкретные потребности и особенности их социально-экономического развития.

Конечная цель РКИК ООН состоит в том, чтобы «добиться… стабилизации концентрации парниковых газов в атмосфере на таком уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему» и, тем самым, предотвратить глобальные изменения климата. Вместе с тем «…такой уровень должен быть достигнут в сроки, достаточные для естественной адаптации экосистем к изменению климата, позволяющее не ставить под угрозу производство продовольствия и обеспечивающие дальнейшее экономическое развитие на устойчивой основе».

12 декабря 2015 г. по итогам 21-й Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата, было принято и подписано большинством стран, включая Россию, а затем ратифицировано почти всеми из них (185 из 197 стран) Парижское соглашение по климату [5].

Заявленная цель документа – не допустить превышения глобальной средне-

годовой температуры на планете к 2100 г. более чем на 2°С от доиндустриального уровня (1850–1900 гг.) и сделать всё возможное для удержания потепления в пределах 1,5°С. Соглашение обязывает все страны принять стратегии долгосрочного развития с низкими уровнями выбросов парниковых газов на период до 2050 г.

Члены Соглашения также взяли на себя обязательство наладить международный обмен «зелёными» технологиями в сфере энергоэффективности, промышленности, строительства и сельского хозяйства. Кроме того, развитые страны должны будут оказывать помощь наиболее слабым и уязвимым странам в адаптации к негативным последствиям изменения климата, а также в их экономическом развитии без роста или с минимальным ростом выбросов парниковых газов.

Соглашение начало действовать в 2021 г.

Правовые аспекты декарбонизации энергетики и транспорта в Российской Федерации полностью корреспондируются с мировыми тенденциями и оценками.

21 сентября 2019 г. Россией было ратифицировано Парижское соглашение [6]. Согласно принципу национально определяемых приоритетов, Россия определила целевые ориентиры по снижению выбросов ПГ до уровня 70–75% относительно показателей 1990 года, в том числе с учетом поглощающей способности лесов.

Особое внимание планируется уделять повышению энергоэффективности, что является одним из ключевых факторов снижения энергоемкости ВВП и сокращения объема выбросов ПГ.

Дальнейшим развитием РКИК ООН в РФ стал Указ Президента РФ О сокращении выбросов парниковых газов от 4 ноября 2020 года № 666 [7], обязывающий Правительство разработать соответствующую стратегию, а 02.07.2021 в РФ был принят Федеральный Закон от № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [8], который вступил в законную силу 01.01.2022 года.

После принятия вышеупомянутого Закона, выходит в свет Распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р. [9] «Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» (далее – Стратегия).

Стратегией предусматривается ряд мер по ее реализации. Ниже перечислены мероприятия, относящиеся к сфере энергетики и транспорта.

В энергетике:

– замещение части угольной генерации на безуглеродную и низкоуглеродную, рост выработки электроэнергии, обеспечивающий потребности экономики, за счет безуглеродной генерации, а также снижение выбросов действующей угольной генерации за счет внедрения современных технологий;

– увеличение объемов утилизации попутного нефтяного газа;

– создание экспортного сектора по производству водорода на основе углеводородного сырья и за счет производства низкоуглеродного водорода для выхода на международный рынок торговли водородом и развития отрасли водородных технологий за счет мероприятий по запуску коммерческих водородных предприятий, создание водородно-производственных комплексов, организация цепочек поставок водорода на внешний и внутренний рынки и наращивание доли водорода в экспортируемой продукции;

– снижение энергетических и материальных затрат, применение энергоэффективных технологий (парогазовые установки, комбинированная выработка электричества и тепла), своевременный вывод из эксплуатации или модернизация морально и физически изношенного малопроизводительного оборудования, совершенствование теплоизоляции;

– снижение потерь в электрических и тепловых сетях для обеспечения экономичности работы электрических и тепловых сетей за счет уменьшения потерь при передаче и распределении энергии;

– развитие распределенной генерации (в том числе в изолированных энер-

госистемах) с учетом необходимости сохранения стабильности функционирования единой энергосистемы;

– создание дополнительных источников электрогенерации, за счет которых будут снижены потери при транспортировке электроэнергии;

– значительное увеличение генерации на основе возобновляемых источников энергии при обеспечении необходимого уровня локализации производства оборудования на территории Российской Федерации с соблюдением принципов экологической ответственности, в том числе при добыче редкоземельных металлов;

– раскрытие для потребителей информации о происхождении электроэнергии и ее «углеродного следа»;

– использование отдельных видов отходов (в том числе не подлежащих материальной утилизации) в качестве энергетических ресурсов;

– внедрение инновационных ресурсо- и энергоэффективных технологий добычи, обогащения, переработки и транспорта твердых ископаемых топлив.

В транспорте:

– изменение структуры грузо- и пассажирооборота в пользу менее углеродоемких видов транспорта;

– использование новых энергоэффективных транспортных средств, масштабная электрификация и газификация общественного транспорта, перевод автомобильного транспорта на гибридные энергоустановки, стимулирование перехода на использование моделей с нулевым уровнем выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ, стимулирование использования общественного транспорта;

– строительство газомоторной и электрозарядной инфраструктуры для различных категорий транспорта, обеспечение упрощенного доступа транспортных средств к топливу с более низким углеродным следом;

– снижение объема природного газа, расходуемого при выработке энергии, повышение энергетической эффективности в технологических операциях, снижение потерь;

– внедрение новых транспортных и информационных технологий контроля и позиционирования, разработка и внедрение интеллектуальных информационных систем мониторинга и управления на транспорте;

– развитие транспортной инфраструктуры и логистики, позволяющее оптимизировать управление транспортными потоками, повысить пропускную способность транспортной инфраструктуры, среднюю скорость движения.

В развитие перечисленных выше актов во время написания настоящей рукописи Президент России Владимир Путин подписал Федеральный закон от 06.03.2022 N 34-ФЗ «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации» [10]. Закон предписывает провести на Сахалине с 1 сентября 2022 года по 31 декабря 2028 года эксперимент по ограничению выбросов парниковых газов.

Цель эксперимента - достижение до 31 декабря 2025 года углеродной нейтральности на территории Сахалинской области. Закон не исключает проведение подобных экспериментов в других субъектах Российской Федерации.

Экологические аспекты декарбонизации энергетики. Выполнение перечисленных выше Законодательных актов позволит активно влиять на проблему декарбонизации.

Термин «декарбонизация» трактуется как снижение вредных выбросов. В отечественной энергетике достаточно долго применяется термин «теплофикация», который означает совместную выработку тепловой и электрической энергии, которая, в свою очередь, обеспечивает как «декарбонизацию», так и на 20–40% снижает потребление первичного топлива (энергоемкость) и, соответственно, уменьшает загрязнение атмосферы оксидами углерода COx, азота NOx и серы SOx, золой, а также термическое загрязнение водоемов и атмосферы [11].

С развитием науки и техники, проблема декарбонизации может решаться

различными способами и методами, однако не все они могут быть в одинаковой мере применимы для разных стран.

Согласно [11], в РФ по сравнению с 1990 годом произошло значительное снижение суммарных выбросов CO_2 (рис. 1), что, очевидно, можно объяснить не только снижением производственных мощностей, сокращением выработки электроэнергии и спадом добычи и потребления нефти, но также и развитием новых технологий, о чем будет изложено ниже.

Анализ, проведенный ведущей международной компанией Accenture [12], предоставляющей спектр решений и услуг в области стратегии, консалтинга, цифровизации бизнеса, технологий и операций, позволяет сделать вывод о том, что основные статьи по вредным выбросам занимают такие сектора, как электроэнергетика и транспорт в совокупности (рис. 2).

Именно эти сферы деятельности будут проанализированы далее.

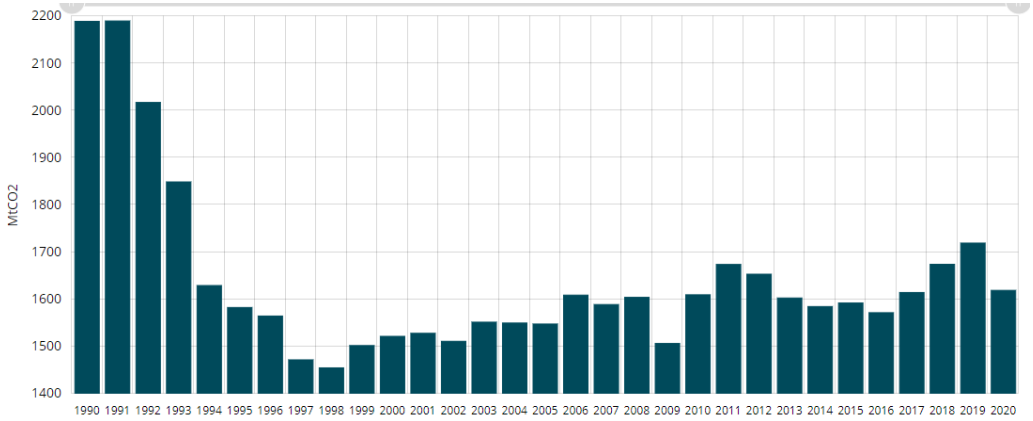


Рис. 1. Динамика выбросов CO_2 в Российской Федерации с 1990 по 2020 гг.
Fig. 1. Dynamics of CO_2 emissions in the Russian Federation from 1990 to 2020

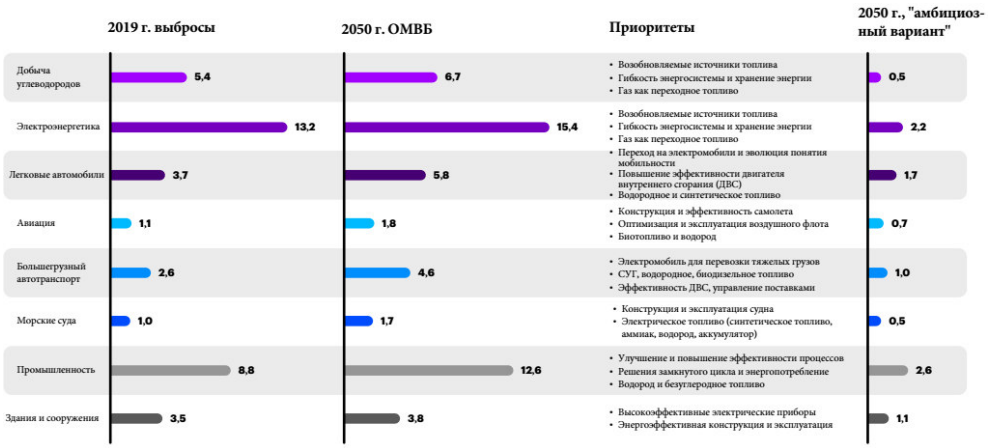


Рис. 2. Глобальные выбросы CO_2 по секторам (гигатонн эквивалента CO_2)
Fig. 2. Global CO_2 emissions by sector (gigatonnes of CO_2 equivalent)

30-летний опыт Дании по повышению топливной (экологической) эффективности ТЭЦ на единицу тепловой энергии от ТЭЦ тратится топлива в 3-4 раза меньше, чем в ТЭЦ России (благодаря закону о теплоснабжении в Дании [13].

Законодатели северных европейских стран успешно продвигают когенерацию (теплофикацию), запрещают строитель-

ство котельных мощностью выше 1 МВт без комбинированного способа производства электроэнергии.

Тот же источник констатирует: «К сожалению, за последние 30 лет, с переходом России на рыночные отношения, расцвела так называемая «котельнизация» – процесс, обратный теплофикации с массовым отказом от утилизации тепла отработанного (бросового) пара турбин существующих ТЭЦ, с отказом от строительства новых ТЭЦ, с демонтажом существующих магистральных тепловых сетей, с массовым переходом на собственные, квартальные и так называемые «крышные» котельные».

В качестве примера отказа от теплофикации можно привести строительство в 2019 г. сверхсовременной котельной в московском микрорайоне Саларьево тепловой мощностью 420 МВт и отказ от производства комбинированной энергии на ТЭЦ ПГУ мощностью 315 МВт. В результате получен перерасход топлива и, соответственно, рост выбросов углекислого газа не менее чем на 41,7%.

В г. Севастополе уже несколько лет подряд в правительстве города при утверждении (ежегодном) так называемой «Схемы теплоснабжения города Севастополя до 2036 года» игнорируются последние требования Законодательства по снижению выбросов в атмосферу [6-9], предлагаются схемные решения, продвигающие ту самую «котельнизацию», критика которой уже давно звучит в авторитетных источниках [13–16]. Так, с целью продвижения «котельнизации» в Севастополе после 2015 г. был расторгнут договор по разработке «Схемы теплоснабжения» с компанией «Энергоэффективный город» и заключен договор с компанией Ивэнергосервис. Компания «Энергоэффективный город» в качестве приоритетного направления прорабатывала вариант «комбинированной выработки тепла и электроэнергии, так как при этом достигается наиболее высокий коэффициент полезного действия сжигания топлива» [17]. Напротив, компания Ивэнергосервис при разработке схем теплоснабжения не занимается технологиями комбинированной выработки тепла и электричества.

Получается нелепая ситуация: мир развивается по технологиям, которые процветали еще в СССР, а некоторые Российские муниципальные администрации под лозунгом «раз Советское – значит негативное» проводят политику, противоречащую здравому смыслу, законам термодинамики и элементарной логике. Приоритет отдается строительству автоматизированных блочно-модульных котельных (АБМК) взамен существующей ТЭЦ, Строительство блочно-модульных котельных в жилой зоне взамен ТЭЦ (даже с КПД 92–94%), по мнению авторов, будет наносить вред окружающей среде, что значительно снизит эффективность и экологическую значимость подобных проектов (рис. 3 [18]).

Рис. 3 наглядно демонстрирует несостоятельность планов по децентрализации ТЭЦ. Вместо применения гибких мультигенерационных систем с использованием отечественного оборудования на территории ТЭЦ [14, 15] предусматривается установка в жилой зоне восьми АБМК иностранного производства. Кроме того, создание собственной муниципальной электрогенерации позволило бы вырабатывать электроэнергию (по подсчетам авторов [14, 15]) в два раза дешевле, чем снабжение от существующего поставщика, что могло бы покрыть потребности ЖКХ («Водоканал», «Электротранс», «Горсвет» и «Севтеплоэнерго») со всеми вытекающими позитивными социальными последствиями.

Пока шла подготовка настоящего исследования в свете текущих событий в РФ и Украине, на заседании президиума Правительственной комиссии по региональному развитию [19] вице-премьером Маратом Хуснуллиным было предложено губернаторам регионов «…контролировать строительство в ручном режиме и вести мониторинг проблемных вопросов для их своевременного решения. Особое внимание он уделил необходимости проведения анализа рисков региональных предприятий на предмет обеспече-

ния импортозамещения материалов и оборудования». Кроме того, было обращено особое внимание на сферу ЖКХ: «Для нас сфера ЖКХ – это тоже мощный драйвер развития и поддержания системы жизнеобеспечения страны. Прошу этим заниматься серьёзно».

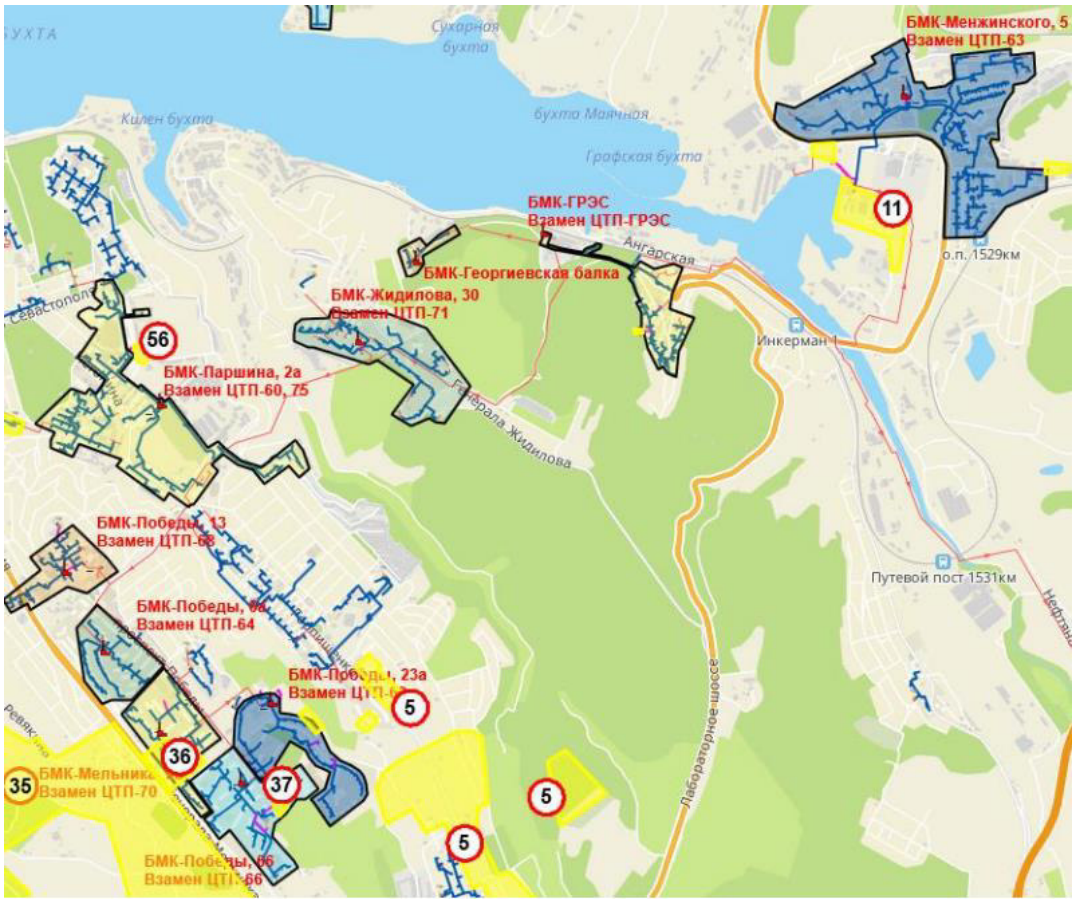


Рис. 3. Зоны действия новых АБМК в зоне действия Севастопольской ТЭЦ после децентрализации и площадки новой застройки (показаны желтым цветом)
Fig. 3. Areas of operation of new ABMBR in the area of operation of the Sevastopol Combined Heat and Power Plant after decentralization and the site of new development (shown in yellow)

Именно эти позиции ставились во главу угла при разработке «Принципов построения электротеплогенерирующего комплекса муниципальной энергетики» [14], которая относится к объектам малой энергетики.

Согласно отчету Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) за 2019 г. [20] «В настоящее время средний объём выбросов CO_2 всех существующих в мире электростанций составляет около 570 г на каждый произведённый кВт·ч. В странах ОЭСР интенсивность выбросов CO_2 в настоящее время составляет 430 г/кВт·ч. Для сравнения, такая величина приблизительно соответствует уровню выбросов электростанций, использующих газовые турбины комбинированного цикла (ГТКЦ)».

Следует отметить, что для РФ, обладающей большими ресурсами углеводородных топлив, политику декарбонизации целесообразно было бы проводить не столько по пути постепенного замещения существующих источников энергии, сколько идти по пути сокращения выбросов применением новейших технологий и повышением топливной эффективности источников энергии и транспорта. Такой подход подтверждается рядом исследований. Так, в исследовании [21] констатируется, что клима-

тические условия РФ, которая расположена в высоких широтах, более 60% территории находятся в зоне вечной мерзлоты, что не способствует на этих территориях развивать солнечную энергетику. «До появления термоядерной энергетики Россия должна максимально полагаться на свои углеводородные ресурсы и исходить из своих экономических и стратегических интересов, а не следовать зарубежным веяниям. Но учитывать эти веяния необходимо, извлекая из них максимальную пользу и выгоду.

В работе [22] отмечается, что снижению так называемого углеродного следа будут способствовать меры: «Замещение угля природным газом. Замещение 1 т у.т. природным газом позволяет обеспечить снижение выбросов оксидов азота – до 32%; диоксида серы – до 99%; оксида углерода – до 68%; золы, сажи – на 100%; диоксида углерода – до 50%.

Программа газификации регионов России позволила кардинально решить экологические проблемы энергетики. В том числе недавний перевод электростанций г. Владивостока на газ позволил снизить общие годовые выбросы загрязняющих веществ в городе в 4 раза (по данным Росстата)».

Таким образом, переход энергетики на природный газ по повышению эффективности топливоиспользования (когенерация, мультигенерация) может внести свой вклад в решение стратегических задач по снижению парникового эффекта. Дополнительным средством такого перехода можно считать дальнейшее повышение энергоэффективности первичных источников энергии (газовых и паровых турбин, газовых двигателей внутреннего сгорания).

Экологические аспекты декарбонизации транспорта. Учитывая «вклад» транспорта в повышение углеродного следа (см. рис. 2) следует отметить не только положительный эффект от перевода транспорта на газообразные виды топлива и электрическую тягу, но и проанализировать проблемные вопросы, связанные с этим переводом.

Автотранспорт является одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха в крупных городах страны. Согласно [23], начиная с 2013 г. объем выбросов от автотранспорта сохранял тенденцию к увеличению и в 2018 г. составил 15,1 млн т, однако в 2019 г. резко сократился и составил 5291 тыс. т. В 2020 г. объем выбросов от автотранспорта по сравнению с 2019 г. сократился на 3% и составил 5137 тыс. т.

Международными актами важнейшей мерой считается переход автомобилей на электротягу, однако в исследовании [24] отмечается, «что в настоящее время внедрение электромобилей носит в некотором смысле маркетинговый характер. Отказ от бензиновых и дизельных двигателей не приведет в краткосрочной перспективе к смещению баланса в национальном и мировом масштабе к безуглеродным источникам энергии: просто сгораемое топливо будет использоваться не непосредственно в двигателях автомобилей, а на электростанциях, где будет вырабатываться электроэнергия для автомобилей».

Действительно, говорить об электрификации транспорта без учета того, что системы аккумулирования энергии транспорта нужно чем-то подпитывать, просто неуместно. Очевидно, что энергия, которая используется на создание этих источников и этих двигателей, также должна подвергаться строгому учету.

Согласно [22] транспортный сектор содержит значимый потенциал для снижения выбросов парниковых газов, если учитывать не только газовыхлоп, но и цепочку от производства бензина до заправки. В работе отмечается: «углеродный след» бензина (от скважины до заправки) превышает в 4 раза «углеродный след» этих производственных этапов для природного газа. Поэтому замена бензина на компримированный природный газ (КПГ) может быть эффективной мерой в реализации целей по защите климата, в том числе».

Роль метана и водородной энергетики в изменении климата также не является однозначной. Согласно докладу Межгосударственной группы экспертов по изменению климата [25], «меры по ограничению антропогенных выбросов

метана в приземной слой с присутствием озона определены как ситуация «обоюдного выигрыша»: могут приводить как к охлаждению, так и потеплению климата». А переход на водородное топливо с учетом затрат углеводородных топлив на его производство, также не является очевидным преимуществом [26].

Для оценки экологического эффекта при использовании различных видов топлив важно учитывать все этапы их жизненного цикла.

Согласно исследованию [26], «…показатели экологической эффективности использования природного газа лучше показателей, характерных для бензина и дизельного топлива. В частности, при использовании компримированного природного газа (КПГ):

– удельные выбросы загрязняющих веществ в 3 раза меньше, чем у дизельного топлива, и в 6 раз меньше, чем у бензина;

– удельные выбросы парниковых газов в 1,7 раза меньше, чем у дизельного топлива, и в 2 раза меньше, чем у бензина;

– значение «токсического следа» в 5 раз меньше, чем у дизельного топлива, и в 3 раза меньше, чем у бензина».

В том же исследовании отмечается, что производство электромобилей (один из этапов жизненного цикла) связано с гораздо большим количеством вредных выбросов, чем производство автомобилей с двигателями внутреннего сгорания.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что перевод транспорта на газообразные виды топлива и дальнейшее повышение эффективности газовых двигателей наряду с применением электропривода может значительно улучшить экологическую составляющую его использования.

В настоящее время усилия муниципалитетов направлены на газификацию муниципального транспорта, хотя львиную долю транспорта в населенных пунктах составляет личный транспорт, доля которого постоянно возрастает, а стимулирование перевода личного транспорта на газообразное топливо практически отсутствует. Существующие правовые механизмы для этого практически не совершенствуются, и, кроме того, такой перевод в настоящее время является для автомобилистов достаточно затратным.

Выводы. В отечественной энергетике и сфере транспорта в ближайшем будущем в целях снижения парникового эффекта можно выделить такие актуальные направления как:

– повышение энергоэффективности всех секторов энергетики и транспорта за счет применения эффективных технологий производства и использования газа, а также утилизации продуктов его сгорания;

– развитие новых технологий в производстве и потреблении электроэнергии и тепла на объектах малой энергетики (когенерация, мультигенерация и др.);

– развитие гибридных энергетических установок с интегрированными возобновляемыми источниками энергии;

– совершенствование и развитие правовых и экономических механизмов, стимулирующих перевод двигателей внутреннего сгорания на газообразное топливо;

– повышение эффективности газовых двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Всемирная* метеорологическая организация [Электронный ресурс] URL: https://public.wmo.int/ru/media/пресс-релизы/2020 год стал одним из трехсамых теплых лет в истории-наблюдений (дата обращения – 01.03.2022).

2. *Климатолог* рассказал о последствиях глобального потепления [Электронный ресурс] URL: https://wwf.ru/resources/blogs/plain-language-about-the-foundation-s-work/posts/a-climatologist-told-about-the-consequences-of-global-warming/ (дата обращения – 07.05.2022)

3. *Рамочная* Конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата // Московский журнал международного права. 1993. № 2. С. 177–195.

4. *Киотский* протокол к рамочной конвенции организации Объединенных наций об изменении климата (Киото, 11 декабря 2007 г.) // Экологический консалтинг. 2009. № 4 (36). С. 27–41.

5. *Парижское* соглашение [Электронный ресурс] URL: https: //unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (дата обращения – 02.03.2022).

6. *Постановление* Правительства РФ от 21 сентября 2019 г. № 1228 № 1228 «О принятии Парижского соглашения» [Электронный ресурс] URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72661694/ (дата обращения - 04.03.2022).

7. *Указ* Президента Российской Федерации от 04.11.2020 г. № 666 от 04.11.2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» [Электронный ресурс] URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990 (дата обращения - 04.03.2022).

8. *Федеральный* закон от 02.07.2021 N 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [Электронный ресурс] URL: https://demo.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=doc&ts=BZVi00TBpuKZhZjB&cacheid=4A1C24A69EC6AD7FC94A44309C8B1925&mode=splus&rnd=e5DGWg&base=LAW&n=388992#RwWi00TV0MkGbt8O (дата обращения – 04.03.2022).

9. *Распоряжение* Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-р. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» [Электронный ресурс] URL: http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf (дата обращения – 03.03.2022).

10. *Федеральный* закон от 06.03.2022 № 34-ФЗ «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации» [Электронный ресурс] URL: http://www.consultant.ru/law/hotdocs/73853.html/ (дата обращения – 05.05.2022).

11. *Статистический* Ежегодник мировой энергетики 2020 [Электронный ресурс] URL: https://yearbook.enerdata.ru/co2-fuel-combustion/CO2-emissions-data-from-fuel-combustion.html (дата обращения 02.05.2022).

12. *Декарбонизация* энергетического сектора: с максимума до нуля. Обзор. [Электронный ресурс] URL: https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-149/Accenture-Decarbonizing-Energy-Achieve-Net-Zero-Emissions.pdf.

13. *Богданов А.Б.* Декарбонизация Российской энергетики на основе теплофикации // Энергосбережение. 2022. № 1. С. 50–64.

14. *Матвеенко В.Т., Дологлонян А.В., Очеретяный В.А.* Принципы построения электротеплогенерирующего комплекса муниципальной энергетики // Системы контроля окружающей среды. 2018. № 14 (34). С. 143–149.

15. *Дологлонян А.В., Матвеенко В.Т, Олейников А.М.* Закономерности функционирования муниципального электрогенерирующего комплекса // Проблемы и вопросы современной науки. 2018. Вып. 1 (1). Ч. 2. С. 44–50.

16. *Березинец, П.А.* О проблеме «котельнизации» России // Электрические станции. 2019. № 1 (1050). С. 2–7.

17. *Схему* теплоснабжения Севастополя разрабатывают в Москве [Электронный ресурс] URL: https://sevastopol.bezformata.com/listnews/shemu teplosnabzheniya sevastopolya/41356043/ (дата обращения – 05.03.2022).

18. *Схема* теплоснабжения города Севастополя на период до 2036 г.: Актуализированная версия Обосновывающие материалы к схеме теплоснабжения Глава 4. Существующие и перспективные балансы тепловой мощности источников тепловой энергии и тепловой нагрузки потребителей / ЗАО «Ивэнергосервис».Севастополь: 2021. 136 с.

19. *Марат* Хуснуллин провёл заседание президиума Правительственной комиссии по региональному развитию 3 марта 2022 г. [Электронный ресурс] URL: http://government.ru/department/545/events/# (дата обращения – 07.03.2022).

20. *Стоимость* декарбонизации: Издержки в энергосистемах с большими долями ядерной и возобновляемой энергии [Электронный ресурс] URL: https://rosatom.ru/upload/docs/Decarbonisation.pdf (дата обращения – 05.03.2022).

21. *Арутюнов В.* Российский акцент в мировом энергопереходе // Энергетическая политика. 2021. № 8 (162). С. 30–41. DOI 10.46920/2409-5516_2021_8162_30.

22. *Аксютин О.Е.* Современные риски и возможности для устойчивого развития рынка природного газа // Энергетическая политика. 2017. № 1. С. 63–72.

23. *О состоянии* и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2021. 864 с.

24. *Плотников В.А.* Новый облик мировой энергетики и экономическая безопасность России // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2020. № 2 (44). С. 39–43.

25. *ОЭСР/АЯЭ* (2022 г.),Бюллетень по ядерному праву, том 2021 г., выпуск 1. Издательство ОЭСР, Париж [Электронный ресурс] URL: https://doi.org/10.1787/f879b7c8-en (дата обращения – 10.03.2022).

26. *Ишков А.Г.***,** *Пыстина Н.Б., Романов К.В., Тетеревлев Р.В.* Экологические аспекты использования газа в качественном топливе на основе оценки полного рабочего цикла // Транспорт на альтернативном топливе 2018. № 6 (66). С. 45–54.

LEGAL, ENVIRONMENTAL ASPECTS AND FEATURES OF DECARBONIZATION OF ENERGY AND TRANSPORT IN THE RUSSIAN FEDERATION

A.G. Klimenko[1], V.A. Ocheretyaniy[2]

[1]Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28
[2]Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The main sources of harmful emissions in the field of energy and transport were investigated, the main measures aimed at reducing the greenhouse effect taking into account the peculiarities of the geographical position of the Russian Federation were proposed. Measures are proposed to reduce harmful emissions in the field of energy and transport, taking into account the requirements of the latest legislative acts, as well as the peculiarities of the domestic oil and gas sector. In the field of transport, the advantages of converting internal combustion engines to gaseous fuel were investigated in comparison with the wide introduction of electric vehicles, taking into account the full life cycle from transport production and fuel production to refueling.

Keywords: emissions reduction, decarbonization, energy, transport, low carbon technologies, internal combustion engine, gas engine.

REFERENCES

1. https://public.wmo.int/ru/media/press-relizy/2020-god-stal-odnim-iz-treh-samyh-teplyh-let-v-istorii-nabljudenij (March 01, 2022).

2. https://wwf.ru/resources/blogs/plain-language-about-the-foundation-s-work/posts/a-climatologist-told-about-the-consequences-of-global-warming/ (May 07, 2022)

3. *Ramochnaja* Konvencija Organizacii Ob#edinennyh Nacij ob izmenenii klimata (United Nations Framework Convention on Climate Change). *Moskovskij zhurnal mezhdunarodnogo prava*, 1993, No. 2, pp. 177–195.

4. Kiotskij protokol k ramochnoj konvencii organizacii Ob#edinennyh nacij ob izmenenii klimata (Kioto, 11 dekabrja 2007 G.) (Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (Kyoto, 11 December 2007)). *Ekologicheskij konsalting*, 2009, No. 4 (36), pp. 27–41.

5. https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (March 02, 2022).

6. https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72661694/ (March 04, 2022).

7. http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990 (March 04, 2022).

8.https://demo.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=doc&ts=BZVi00TBpuKZhZjB&cacheid=4A1C24A69EC6AD7FC94A44309C8B1925&mode=splus&rnd=e5DGWg&base=LAW&n=388992#RwWi00TV0MkGbt8O (March 04, 2022).

9. http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf (March, 03, 2022).

10. http://www.consultant.ru/law/hotdocs/73853.html/ (May 05, 2022).

11. https://yearbook.enerdata.ru/co2-fuel-combustion/CO2-emissions-data-from-fuel-combustion.html (May 02, 2022).

12. https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-149/Accenture-Decarbonizing-Energy-Achieve-Net-Zero-2Emissions.pdf.

13. *Bogdanov A.B.* Dekarbonizacija Rossijskoj jenergetiki na osnove teplofikacii (Decarbonization of the Russian energy sector based on district heating). *Energosberezhenie*, 2022. No. 1, pp. 50–64.

14. *Matveenko V.T., Dologlonjan A.V., and Ocheretjanyj V.A.* Principy postroenija jelektroteplogenerirujushhego kompleksa municipal'noj jenergetiki (Principles of construction of the electric heat generating complex of the municipal power industry). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2018, No. 14 (34), pp. 143–149.

15. *Dologlonjan A.V., Matveenko V.T., and Olejnikov A.M.* Zakonomernosti funkcionirovanija municipal'nogo jelektrogenerirujushhego kompleksa. *Problemy i voprosy sovremennoj nauki*, 2018, Vol. 1(1), Part 2, pp. 44–50.

16. *Berezinec P.A.* O probleme ”kotel'nizacii”. *Elektricheskie stancii*, 2019, No. 1(1050), pp. 2–7.

17. https://sevastopol.bezformata.com/listnews/shemu-teplosnabzheniya-sevastopolya/41356043/(data obrashhenija (March 03, 2022).

18. Shema teplosnabzhenija goroda Sevastopolja na period do 2036 g.: Aktualizirovannaja versija Obosnovyvajushhie materialy k sheme teplosnabzhenija Glava 4. Sushhestvujushhie i perspektivnye balansy teplovoj moshhnosti istochnikov teplovoj jenergii i teplovoj nagruzki potrebitelej (Heat supply scheme of the city of Sevastopol for the period up to 2036: Updated version Substantiating materials for the heat supply scheme. Chapter 4. Existing and prospective balances of thermal power of heat energy sources and heat load of consumers). Ivenergoservice Closed Joint Stock Company, Sevastopol, 2021, 136 p.

19. http://government.ru/department/545/events/# (March 07, 2022).

20. https://rosatom.ru/upload/docs/Decarbonisation.pdf (March 05, 2022).

21. *Arutjunov V.* Rossijskij akcent v mirovom jenergoperehode (Russian emphasis in global energy transition). *Energeticheskaya politika*, 2021, No. 8(162), pp. 30–41.

22. *Aksjutin O.E.* Sovremennye riski i vozmozhnosti dlja ustojchivogo razvitija rynka prirodnogo gaza (Modern risks and opportunities for sustainable development of the natural gas market). *Energeticheskaya politika*, 2017, No. 1, pp. 63–72.

23. O sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy Rossijskoj Federacii v 2020 godu (On the State and Environmental Protection of the Russian Federation in 2020). Moscow: Ministry of Nature of Russia, Lomonosov Moscow State University, 2021, 864 p.

24 *Plotnikov V.A. and. Rukinov M.V.* Novyj oblik mirovoj jenergetiki i jekonomicheskaja bezopasnost' Rossii (The new look of world energy and economic security of Russia). *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij*, Series: Economics, Finance and Manufacturing Management, 2020, No. 2 (44), pp. 39–43.

25. https://doi.org/10.1787/f879b7c8-en (March 10, 2022).

26. *Ishkov A.G., Pystina N.B, Romanov K.V., and Teterevlev R.V.* Jekologicheskie aspekty ispol'zovanija gaza v kachestvennom toplive na osnove ocenki polnogo rabochego cikla (Environmental aspects of using gas in high-quality fuel based on the assessment of the full operating cycle). *Transport na al'ternativnom toplive*, 2018, No. 6 (66), pp. 45–54.

УДК 551.468.1+574.24 (262.5+477.75) DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-73-83

АДАПТАЦИИ БЕРЕГОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ К ЭКОЛОГИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ КОНТАКТНОЙ ЗОНЫ «СУША-МОРЕ»

И.В. Агаркова-Лях[1], К.В. Фролова[1], А.М. Лях[2]

[1]Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: iva_crimea@mail.ru, karin-frolov@mail.ru
[2]ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»
РФ, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2
E-mail: me@antonlyakh.ru

Изучены адаптации 40 родов из 19 семейств растений, обитающих на черноморских берегах Крыма. Установлено, что наибольшее влияние на жизнь растений оказывает морская вода как фактор засоления и динамичности береговых отложений. Анализ адаптаций позволил разделить их на группы по внешнему и внутреннему строению листа, типу корневой системы, размножению, габитусу, продолжительности цветения. Опираясь на видовую частоту встречаемости растений, можно говорить о доминировании среди них биоморфологических адаптаций в строении листа, особенностях корневой системы и размножении.

Ключевые слова: береговая растительность, засоление, черноморские берега Крыма, аккумулятивные и абразионные берега, биоморфологические адаптации.

Поступила в редакцию: 31.05.2022.

Введение. Растительность морских побережий развивается в зоне контакта и под непосредственным влиянием суши и моря. Различия их физических свойств приводят к значительной контрастности протекающих здесь физико-географических процессов и формированию довольно жестких, вплоть до экстремальных, экологических условий. Между тем, береговая растительность приспособилась выживать даже в таких условиях.

Вопросам изучения адаптаций растений на морских побережьях посвящен ряд работ отечественных и зарубежных исследователей, охватывающих регионы с различными климатическими условиями (Японское, Охотское, Баренцево, Северное и Балтийское моря; Арктический бассейн). В большей части публикаций анализируются биоморфологические и физиологические адаптации [1-8].

Растительность черноморских берегов Крыма и Кавказа в границах Российской Федерации изучена сравнительно хорошо [9-18]. Однако механизмы ее адаптаций в зоне контакта «суша-море» рассмотрены, главным образом, в рамках описания видового состава растений отдельных участков Крымско-Кавказского побережья [9-12, 15-18]. Отсутствие подробных обобщающих работ в этом направлении определило актуальность настоящего исследования.

Цель работы – проанализировать и обобщить виды адаптаций береговой растительности к экологическим условиям контактной зоны «суша-море». Объект исследования – растительность черноморских берегов Крыма. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: 1) рассмотреть специфику экологических условий в зоне контакта «суша-море»; 2) выявить и систематизировать виды адаптаций береговой растительности на черноморском побережье Крыма; 3) определить доминирующие виды адаптаций и установить их связь с типами морских берегов черноморского побережья Крыма.

Материалы и методы. Источниками информации выступили: опубликованные работы, онлайн-атлас и определитель растений Плантариум [19], электронный ресурс «The Plant List» [20], результаты собственных полевых наблюдений за растительностью на крымских берегах разного типа в период

с 1998 г. по настоящее время. Обработка полученных материалов велась методами: идентификации видов растений, индукции, анализа и синтеза, сравнительно-описательным и сравнительно-географическим. На этапе полевых работ применялись методы наблюдений, геоботанических описаний флоры, фотометод.

Полученные результаты. Зона контакта «суша-море» представляет собой область соприкосновения и активного взаимодействия трех контрастных сред географической оболочки: атмосферы, гидросферы и литосферы. Их взаимодействия осуществляются на разных уровнях и в разных масштабах. В общем случае, море оказывает на сушу волновое, гидрогеологическое и климатическое воздействия, в связи с чем на суше можно выделить три зоны: 1) формирования берегов и периодического затопления, или полосу волновой переработки берегов; 2) подпора грунтовых вод или гидрогеологического воздействия на почвенный и растительный покров суши; 3) постоянного и эпизодического климатического влияния (рис. 1) [21].

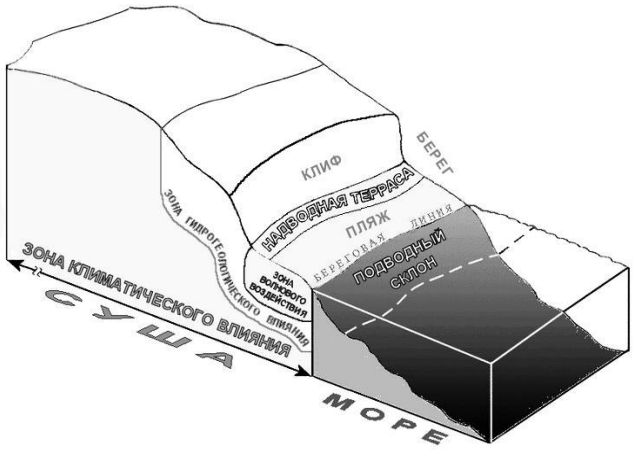


Рис. 1. Зоны морского влияния на сушу
Fig. 1. Zones of marine impact on land

Береговая растительность развивается в пределах первой зоны – формирования берегов и периодического затопления, где сосредоточены, преимущественно, процессы разрушения береговых клифов и создания аккумулятивных форм рельефа. Ее ширина зависит от многих факторов на берегу: литологии и податливости берегов к разрушению, высоты и крутизны клифа или берегового обрыва; наличия и характера пляжных отложений. Кроме того, на протяженность зоны влияют батиметрические и гидродинамические характеристики прибрежной акватории: глубина моря, ветро-волновой режим, длина разгона волн, наличие и высота приливов-отливов. Ширина надводной террасы значительно отличается в разных частях Мирового океана. Так, на черноморском побережье она составляет ширину от первых до нескольких десятков метров, на побережье приливного Северного моря – от 7 до 10-20 км [21].

Границы берега условно можно проводить по двум положениям уреза воды в периоды с диаметрально противоположной волновой активностью: нижнюю – во время штиля, при сгоне уровня моря или в отлив; верхнюю – во время шторма, при нагоне уровня или в прилив. В условиях бесприливного Черного моря, границы берега будут проходить по среднему положению береговой линии с одной стороны, с другой – по бровкам современной надводной террасы на ак-

кумулятивных берегах и клифа или абразионного уступа – на абразионных.

Вместе с количеством поступающего солнечного тепла, ведущим экологическим фактором на берегу выступают гидродинамические или волновые процессы. Гидродинамика контролирует особенности дифференциации обломочного материала, расселение растительности, распределение зооценозов и т.д. В соответствии с гидродинамическим воздействием, на берегу выделяют зоны супралиторали (орошаемой брызгами прибоя) и литорали (приливно-отливной). На берегах бесприливных морей литораль заменяется псевдолиторалью.

Рассмотрим подробнее, какие экологические факторы и как влияют на береговую растительность. Далее представим их качественную оценку, поскольку количественный анализ – довольно сложная задача, которая требует отдельного изучения. При описании факторов разделим их на группы, действующие через три среды: воздушную, водную и твердую.

Воздушная среда. Влияние на береговую растительность процессов, происходящих в атмосфере, многоаспектно и не всегда однозначно. В первую очередь, это связано с граничным положением берега между двумя средами, отличными по своим физическим свойствам.

Неравномерное нагревание воздуха над сушей и морем в течение суток приводит к формированию местной бризовой циркуляции. Днем ветер направлен с моря на сушу, ночью – с суши на море.

С бризами происходит вынос с поверхности моря на сушу морских аэрозолей в виде мельчайших частиц воды и соли. Этот процесс называется импульверизацией. Ионы морских солей оседают на открытых частях растений (стеблях и листьях). Основным компонентом морских аэрозолей является хлорид натрия, но также здесь присутствуют карбонаты, сульфаты, калий, магний и кальций, ряд органических соединений.
Кроме морских аэрозолей, с ветроволновой деятельностью и перемешиванием морской воды, на берег выносятся пена и морские брызги.

В обратном направлении, с воздушными массами суши, на море поступают минеральная пыль и частицы антропогенного происхождения.

Тепловое воздействие моря на сушу осуществляется за счет его высокой теплоемкости: морская вода медленнее нагревается и остывает, нежели суша. В итоге, это приводит к отепляющему влиянию моря на прилегающую территорию, выраженному меньшими амплитудами годовых температур, и формированию более мягкого климата, в сравнении с удаленной от моря сушей.

Высокой ветровой активности в зоне побережий благоприятствуют обширные открытые пространства.

Комбинации различных климатических элементов могут приводить к противоположным эффектам. Например, интенсивное испарение с поверхности морей и океанов способствует повышению влажности и более частому образованию туманов в береговой зоне. Однако, высокая солнечная радиация и испарение приводят к значительному иссушению воздуха на морском берегу. Высокая температура воздуха, ветер и инсоляция увеличивают скорости испарения на берегу, а прибой, высокая влажность воздуха и туманы, напротив, ее уменьшают.

Максимальные количественные характеристики воздушного обмена между морем и сушей наблюдаются во время штормов. Это связано как с разнообразием агрегатных состояний участвующих в нем веществ, так и экстремальными показателями морских волн. В шторма ветер срывает пену с гребней волны и выносит ее на сушу. С пеной на берег поступает концентрат из органического вещества, питающий растения. Разбиваясь о берег, морские волны образуют стену из аэрозольной «пыли» на берегу.

Важнейшим итогом воздушного обмена между морем и сушей является интенсивное засоление приморских территорий и всех открытых частей обитающих на берегу растений.

Морская вода. Основной зоной обитания растений является верхняя, наибо-

лее удаленная от уреза воды часть берега, куда редко достигают морские волны.

Непосредственное действие потоков морской воды на стебли и листья береговой растительности происходит с накатом морских волн во время волновой и штормовой деятельности, при нагонных и приливных явлениях. Далее морская вода просачивается и фильтруется через толщу береговых отложений, проникая к корневой системе растений.

Потоки морской воды также осуществляют работу по перемещению и перераспределению обломочного материала на берегу, образуя аккумулятивные (пляжи) или абразионные (уступы, обрывы и клифы) формы рельефа. При деструктивной деятельности волны способны подмывать корни растений, а в некоторых случаях – и лишать их опоры вследствие размыва пляжных отложений. При наносной аккумулятивной работе волн, береговая растительность, напротив, может частично или полностью перекрываться пляжными отложениями.

Таким образом, потоки морской воды способны воздействовать на все части растения на берегу: корень, стебель и листья.

Береговые отложения выступают в качестве относительно (вследствие их подвижности) твердой основы, в которой закрепляются растения. Субстратом на берегу может являться такой материал: рыхлый мелко- и среднеобломочный (песок, гравий, галька), крупнообломочный (валуны), связный (глина), сцементированный (песчаник, галечник) или скальная порода (массивный известняк, магматические породы и пр.).

Некоторые растения способны жить на береговых обрывах разной крутизны, вплоть до отвесных; в выемках или нишах клифов, где откладываются отложения для их роста и питания.

В результате развития экзогенных процессов на абразионных клифах и береговых обрывах (обвалы, осыпи, оползни, денудация), либо на прилегающей суше (эоловые), на пляж поступает обломочный материал, который может выполнять двоякую роль: поставлять материал для закрепления и питания растений, а также засыпать их слоем отложений.

Вследствие высокой волновой активности и связанной с ней подвижностью отложений, на берегах не может формироваться почвенный горизонт. Можно лишь говорить о его фрагментарном или локальном развитии в крайних, наиболее удаленных от береговой линии зонах, примыкающих к подножиям береговых обрывов или клифов. Отсутствие почвенного горизонта обуславливает дефицит питательных веществ для развития растений.

Итак, совокупность экологических факторов, действующих в зоне контакта «суша-море», приводит к формированию здесь довольно жестких стрессовых условий, вплоть до экстремальных, основными характеристиками которых являются:

1. Высокая инсоляция;
2. Засоление всех частей растения (от листьев и стеблей до корней);
3. Интенсивное испарение;
4. Иссушение воздуха;
5. Ветровая деятельность;
6. Отсутствие почвенного покрова;
7. Низкая питательность субстрата;
8. Динамичность береговых отложений.

Адаптации береговой растительности изучались на примере фитоценозов черноморского побережья Крыма. По материалам опубликованных работ [9-14] и собственным данным, на берегах Крыма обнаружено 19 семейств и 40 родов растений. Помощь в изучении адаптаций оказал онлайн-атлас [19]. Обобщение и анализ адаптаций береговой растительности позволили разделить их на группы по таким признакам: внешнему и внутреннему строению листа, особенностям корневой системы, размножению, габитусу, продолжительности периода цветения. Ниже рассмотрим их подробнее.

Внутреннее и внешнее строение листа. В условиях избытка поступления морских солей, растения выработали ряд адаптаций. По отношению к засолению они делятся на три группы: криногалофиты, гликогалофиты и эвгалофиты. Криногалофиты выделяют соли через секреторные трихомы на нижней сто-

роне листа. Гликогалофиты препятствуют проникновению солей через листовую пластинку благодаря высокому корневому давлению (например, род *Artemisia)*. Эвгалофиты накапливают соли в отдельных частях клеток – вакуолях. Так, листовые пластинки растений-эвгалофитов родов *Suaeda* и *Salicornia* имеют тонкий эпидермис с устьицами, водоносную паренхиму, увеличенный размер клеток, большое количество хлоропластов.

Поскольку на берегах инсоляция довольно значительна, основная часть растений является гелиофитами, способными защищаться от солнца, уменьшая испарение со своей поверхности (род *Capparis*, *Crithmum*). Адаптация к этим условиям происходит через сокращение площади поверхности листьев за счет уменьшения их размеров, повышения изрезанности, проявления скрученности и др., а также изменение текстуры листа и стебля (опушенность и восковой налет). Приспособления также реализуются через особенности внутреннего строения листа: увеличение числа устьиц на единицу площади, утончение листовой пластинки, защитной функции склеренхимы, мясистости листьев.

Виды-аэропедофиты через поверхность листовой пластинки из воздушной среды получают питание для роста и развития.

Строение корневой системы. Для достижения устойчивости в подвижных отложениях, подверженных воздействию морских волн и штормовым ветрам, большая часть растений прибрежной зоны имеет глубокую стержневую корневую систему, мощное мочковатое корневище, цепкие якорные или стелющиеся и ползучие корни и стебли.

Корневая система якорного типа позволяет удерживаться растениям на береговых склонах разной крутизны. Например, род *Salsola* имеет слабо развитый главный корень, но длинные боковые корни растут параллельно поверхности, а затем – по вертикали. Корни каперсов (род *Capparis*) приспособлены к препарированию в верхней части. Род *Carex* образует на поверхности субстрата тонкие, длинные ветвящиеся корневища.

Для борьбы с засыпанием обломочным материалом, от главного корня растений развиваются боковые корни и корневые отпрыски.

За счет длинных корней, некоторые растения способны получать воду из нижних водоносных горизонтов. Так, у каперсов (род *Capparis*) длина корневой системы может достигать 10-12 м.

Корни растений-литофитов способны выделять кислоты для формирования рыхлого субстрата и получения питания из него. Это отмечается, например, у *Isatis littoralis.* Растения рода *Capparis* получают органические вещества благодаря корневой микоризе с азотфиксирующими бактериями.

Размножение. Динамичность среды определяет выработку у растений разнообразных механизмов, обеспечивающих их размножение в экстремальных условиях: опыление в бутоне, преобладание вегетативного размножения над семенным, водонепроницаемую оболочку и быструю всхожесть семян, вегетативное размножение частями корневищ, способность семян выдерживать нахождение в морской воде, использование воды и ветра в качестве распространителей семян.

Габитус. Внешний облик или габитус растений морских берегов связан с необходимостью их выживания в условиях стресса. Например, для сокращения испарения с поверхности растений и защиты от ветров, некоторые растения приобрели такие морфологические признаки, как низкорослость, приземистость; подушковидную, компактную и розеточную формы; прижатость листьев (род *Artemisia, Elytrigia, Crambe, Limonium, Plantago).*

Длительность периода цветения. Комплексное влияние нескольких стрессовых экологических факторов (высокой температуры и малого количества осадков) приводит к адаптивной реакции в виде сокращения продолжительности цветения у *Glaucium flavum* (Мачок жёлтый) из семейства *Papaveraceae* (Маковые).

Обобщенная информация по видам адаптаций растений крымских берегов представлена в табл. 1.

Таблица 1. Виды адаптаций растений морских берегов к экологическим факторам среды

Фактор	Вид адаптации	Род
Засоление	Накопление солей в отдельных частях клеток – вакуолях (эвгалофиты)	*Salicornia, Suaeda*
	Выделение солей через гидатоды или пузыревидные клетки-трихомы на поверхности листовой пластинки (криногалофиты)	*Puccinellia, Limonium, Halimione, Atriplex*
	Препятствование поступлению солей в клетки за счет высокого корневого давления (гликогалофиты)	*Artemisia*
	Опыление в бутоне, водонепроницаемая оболочка семени, переносит выдерживание семян в морской воде	*Glaucium, Halimione, Crithmum*
Высокая инсоляция и интенсивное испарение	Снижение температуры и транспирации за счет: 1) сокращения площади поверхности листа (уменьшение размера, скрученность и изрезанность; изменение угла наклона долей листа в зависимости от освещения)	*Leymus, Crambe, Phragmites, Puccinellia, Juncus, Glaucium*
	2) текстуры поверхности стебля и листа (опушенность, восковой налет)	*Capparis, Leymus, Bassia*
	3) внешнего и внутреннего строения листа: увеличение числа устьиц на единицу площади, утончение листовой пластинки, защитная функция склеренхимы, мясистость листа (суккулентность)	*Carex, Lactuca, Juncus, Suaeda, Puccinellia, Spergularia, Crambe*
	Добыча воды с глубины посредством длинной стержневой корневой системы	*Capparis*
	Сокращение продолжительности цветения в условиях высокой температуры и малого количества осадков	*Glaucium*
Ветер	Низкорослость, приземистость; компактная, подушковидная и розеточная форма; прижатые листья	*Artemisia, Elytrigia, Crambe, Limonium, Plantago*
	Распространение семян ветром (анемофилия)	*Eryngium, Elytrigia, Salsola*
Отсутствие почвы	Получение питательных веществ из воздушной среды (аэропедофиты) и за счет микоризы с азотфиксирующими бактериями	*Glaucium, Lepidium, Capparis, Elytrigia*
	Создание минеральной пищи путем разрушения горных пород путем выделения корнями кислот	*Glaucium, Bassia, Seseli, Atriplex*
Динамичность береговых отложений	Повышение устойчивости, закрепление благодаря типу корневой системы и пространственному размещению стеблей: 1) глубокая стержневая; 2) мочковатая с системой придаточных корней; 3) якорного типа; 4) стелющиеся и ползучие корни и стебли; быстро растущие корни, приспособленные к препарированию их верхней части	*Melilotus, Carex, Elytrigia, Phragmites, Bassia, Salsola, Capparis*
	Вегетативное размножение перекрытых субстратом или размытых водой корневищ	*Elytrigia, Juncus, Leymus*

Видовой состав фитоценозов на берегах Крыма зависит, прежде всего, от гранулометрического и вещественного состава пляжных отложений, генетического типа берегов (абразионный, аккумулятивный) (рис.2). Влияние моря на

береговую растительность тем сильнее, чем меньше ширина пляжа. На берегах с широкими пляжами с удалением от уреза воды морское влияние на растительность ослабевает.

Среди обнаруженных на берегах Черного моря растений, наибольшую встречаемость имеют следующие их семейства, рода и виды:

1. *Poaceae* (Злаковые): *Phragmites australis* (Тростник южный), *Leymus racemosus* (Волоснец кистистый), род *Elytrigia*;

2. *Brassicaceae* (Капустные): род *Crambe*;

3. *Papaveraceae* (Маковые): *Glaucium flavum* (Мачок жёлтый);

4. *Apiaceae* (Зонтичные): *Crithmum maritimum* (Критмум морской), *Eryngium maritimum* (Синеголовник приморский);

5. *Chenopodiaceae* (Маревые): род *Halimione* и род *Atriplex*;

6. *Asteraceae* (Сложноцветные): *Artemisia santonicum* (Полынь сантонинная).



Рис. 2. Береговая растительность на разных типах берегов и пляжей Крыма. **А.** Аккумулятивный берег пересыпи оз. Богайлы (Зап. Крым) с сообществами *Crambe maritima*; **Б.** Абразионный берег у м. Херсонес (Юго-Зап. Крым) с сообществами *Elytrigia obtusiflora;* **В.** Абразионный берег у пос. Береговое (Юго-Зап. Крым) с сообществами *Phragmites australis;* **Г.** Абразионный берег у пос. Парковое (Южный берег Крыма) с сообществами *Lactuca tatarica*

Fig. 2. Coastal vegetation on different types of coasts and beaches of the Crimea. **A**. Accumulative shoreline of the Bogayly Lake (West Crimea) with communities of *Crambe maritima*; **Б.** Abrasion shore near the Cape Chersonese (South-Western Crimea) with communities of *Elytrigia obtusiflora*; **В**. Abrasion shore near the village of Beregovoye (South-Western Crimea) with communities of *Phragmites australis*; **Г.** Abrasion shore near the settlement of Parkovoye (South Coast of Crimea) with communities of *Lactuca tatarica*

На берегах Крыма наиболее разнообразными являются адаптации, связанные с факторами засоления, высокими инсоляцией и испарением, подвижностью береговых отложений. Сходные приспособления отмечаются на берегах разного типа. В этой связи, прямой зависимости видов адаптации растений от их приуроченности к абразионному, аккумулятивному или абразионно-аккумулятивному типу берегов, не выявлено. Способы адаптаций определяются, главным образом, видовой принадлежностью растительности. Основываясь на частоте встречаемости видов растений крымских берегов, можно говорить о доминировании среди них биоморфологических адаптаций внешнего и внутреннего строения листа, типа корневой системы и размножения.

Заключение. Таким образом, условия жизни растений на берегах являются довольно жесткими и экстремальными. Их можно описать следующими экологическими характеристиками: засоление всех сред, высокая инсоляция и интенсивное испарение, иссушение воздуха, отсутствие почвенного покрова, низкая питательность и динамичность отложений на берегу. Среди этих стрессовых условий среды наибольшее влияние на жизнь растений, несомненно, оказывает морская вода как фактор засоления и подвижности береговых отложений.

На основе изучения адаптаций 19 семейств и 40 родов растений черноморского побережья Крыма, они были объединены в группы по внешнему и внутреннему строению листа, особенностям корневой системы, размножению, габитусу, длительности периода цветения.

Наибольшее разнообразие видов адаптаций растительности связано с факторами засоления, высокими инсоляцией и испарением, подвижностью отложений. Сходные адаптации отмечаются на берегах разного типа, поэтому прямой их зависимости друг от друга не выявлено. Основываясь на видовой частоте встречаемости, можно говорить о доминировании среди растений черноморских берегов Крыма биоморфологических адаптаций внешнего и внутреннего строения листа, типа корневой системы и размножения.

Работа выполнена по теме государственного задания ИПТС № 121122300072-3 «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия», и теме государственного задания ФИЦ ИН БЮМ № 121030100028-0 «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бурундукова О.Л.*, *Неупокоева Е.В., Пробатова Н.С.* Галофиты морских побережий юга Дальнего Востока: анатомо-физиологические аспекты адаптации // Животный и растительный мир Дальнего Востока. 1997. № 3. С. 210–215.

2. *Воронкова Н.М.*, *Бурковская Е.В., Безделева Т.А., Бурундукова О.Л.* Морфологические и биологические особенности растений в связи с адаптацией к условиям морских побережий // Экология. 2008. № 1. С. 3–9.

3. *Шибнева С.Ю.* Онтоморфогенез некоторых растений супралиторали // Бюллетень Ботанического сада – Института ДВО РАН. 2010. № 5. С. 170–175.

4. *Левенец И.Р., Покровская Н.В.* Биоморфологические особенности сосудистых растений супралиторали Приморского края // Вестник КрасГАУ. 2016. № 11. С. 85–90.

5. *Рябкова О.И., Герб М.А.* Современное состояние морских берегов Калининградской области и биологические меры защиты от их разрушения // Материалы XXVII Международной береговой конференции «Арктические берега: путь к устойчивости». 2018. С. 265–268.

6. *Rozema J., Bijwaard P., Prast G., Broekman R.* Ecophysiological adaptations

of coastal halophytes from foredunes and salt marshes // Vegetatio. 1985. № 62. P. 499–521.

7. *Maun M.A.* Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes // Canadian Journal of Botany. 2011. № 76 (5). P. 713-738. DOI: 10.1139/b98-058

8. *Flowers T.J., Colmer T.D.* Plant salt tolerance: Adaptations in halophytes // Ann. Bot. 2015. № 115. P. 327–331.

9. *Корженевский В.В., Клюкин А.А.* Растительность бедлендов Крыма // Экология. 1989. № 6. С. 26–33.

10. *Корженевский В.В., Клюкин А.А.* Растительность абразионных и аккумулятивных форм рельефа морских побережий и озер Крыма. Деп. Ялта: НБС, 1990. 108 с.

11. *Корженевская Ю.В.* Аккумуляционно-денудационные процессы как фактор ценозообразования (на примере некоторых растительных сообществ Крыма): Автореф. дис. … канд биол. наук. Ялта. 1999. 19 с.

12. *Едигарян А.А.* Структура флоры приморских ландшафтов абразионных берегов Крымского полуострова // Бюллетень ГНБС. 2008. № 96. С. 5–8.

13. *Мильчакова Н.А., Александров В.В., Бондарева Л.В., Панкеева Т.В., Чернышева Е.Б.* Морские охраняемые акватории Крыма. Научный справочник. Н. Оріанда. 2015. 312 с.

14. *Бондарева Л.В.* Растительность прибрежной зоны Гераклейского полуострова // Сборник научных трудов ГНБС. 2019. Т. 149. С. 41–54.

15. *Крыленко С.В., Лукиных А.И.* Морфологические адаптации растений к обитанию в условиях абразионных берегов // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. Севастополь, 2019. С. 218-220.

16. *Пикалова Н.А.*, *Крыленко В.В.* Ценофлора береговой зоны массива Туапхат // Актуальные проблемы геоэкологии и природопользования. Материалы I Всероссийской научно-практической конференции. Краснодар, 2020. С. 143–146.

17. *Лукиных А.И., Крыленко С.В*. Сосудистые растения абразионного берега северо-западной части черноморского побережья Кавказа // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. № 7-1(46). С. 5–14.

18. *Крыленко С.В.*, *Лукиных А.И.* Характеристики состава растительности абразионного берега северо-западной части черноморского побережья Кавказа // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2021. Т. 31. № 1. С. 16–26.

19. *Плантариум.* Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. 2007–2022. [Электронный ресурс] URL: https://www.plantarium.ru

20. *The Plant List*. Version 1.1. Published on the Internet. [Электронный ресурс] URL: http://www.theplantlist.org

21. *Агаркова-Лях І.В.* Парагенетичні ландшафтні комплекси берегової зони моря (на прикладі чорноморського узбережжя Криму): Автореф. дис. … канд. геогр. наук. Сімферополь. 2006. 21 с.

ADAPTATION OF COASTAL VEGETATION TO THE ECOLOGICAL CONDITIONS OF THE LAND-SEA CONTACT ZONE

I.V. Agarkova-Lyakh[1], K.V. Frolova[1], A.M. Lyakh[2]

[1]Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28
[2]A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, RF, Sevastopol, Nakhimov Av., 2

Adaptations of 40 genera from 19 families of plants inhabiting the Black Sea shores of Crimea have been studied. It has been established that sea water has the greatest influence on plant life as a factor of salinization and dynamism of coastal sediments. The analysis of adaptations allowed dividing them into groups

according to the external and internal structure of the leaf, the type of root system, reproduction, habitus, duration of flowering. Based on the specific frequency of occurrence of plants, we can talk about the dominance of their biomorphological adaptations in the structure of the leaf, the features of the root system and reproduction.

Keywords: coastal vegetation, salination, Black Sea shores of Crimea, accumulative and abrasion shores, biomorphological adaptations.

REFERENCES

1. *Burundukova O.L., Neupokoeva E.V., and Probatova N.S.* Galofity morskih poberezhij juga Dal'nego Vostoka: anatomo-fiziologicheskie aspekty adaptacii (Halophytes of the Seashores of the South of the Far East: Anatomical and Physiological Aspects of Adaptation). *Zhivotnyj i rastitel'nyj mir Dal'nego Vostoka,* 1997, No. 3, pp. 210–215.

2. *Voronkova N.M., Burkovskaja E.V., Bezdeleva T.A., and Burundukova O.L.* Morfologicheskie i biologicheskie osobennosti rastenij v svjazi s adaptaciej k uslovijam morskih poberezhij (Morphological and biological features of plants in relation to adaptation to seashore conditions). *Jekologija*, 2008, No. 1, pp. 3–9.

3. *Shibneva S.Ju.* Ontomorfogenez nekotoryh rastenij supralitorali (Ontomorphogenesis of some plants of the supralittorali). *Bjulleten' Botanicheskogo sada – Instituta DVO RAN,* 2010, No. 5, pp. 170–175.

4. *Levenec I.R. and Pokrovskaja N.V.* Biomorfologicheskie osobennosti sosudistyh rastenij supralitorali Primorskogo kraja (Biomorphological features of vascular plants of Primorsky Krai supralittoralis). *Vestnik KrasGAU,* 2016, No. 11, pp. 85–90.

5. *Rjabkova O.I. and Gerb M.A.* Sovremennoe sostojanie morskih beregov Kaliningradskoj oblasti i biologicheskie mery zashhity ot ih razrushenija (Current state of sea shores of the Kaliningrad region and biological protection measures against their destruction). Materialy XXVII Mezhdunarodnoj beregovoj konferencii “Arkticheskie berega: put' k ustojchivosti”. (Proc. XXVII International Coastal Conference “Arctic shores: the path to sustainability”), 2018, pp. 265–268.

6. *Rozema J.*, *Bijwaard P., Prast G., and Broekman R.* Ecophysiological adaptations of coastal halophytes from foredunes and salt marshes. *Vegetatio*, 1985, No. 62, pp. 499–521.

7. *Maun M.A.* Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes. *Canadian Journal of Botany*, 2011, No. 76(5), pp. 713–738. DOI: 10.1139/b98-058

8. *Flowers T.J. and Colmer T.D.* Plant salt tolerance: Adaptations in halophytes. *Ann. Bot,* 2015, No. 115, pp. 327–331.

9. *Korzhenevskij V.V. and Kljukin A.A.* Rastitel'nost' bedlendov Kryma (Vegetation of the Crimean poorlands). *Jekologija*, 1989, No. 6, pp. 26–33.

10. *Korzhenevskij V.V. and Kljukin A.A.* Rastitel'nost' abrazionnyh i akkumuljativnyh form rel'efa morskih poberezhij i ozer Kryma (Vegetation of abrasion and accumulative landforms of seashores and lakes of Crimea). Dep, Jalta: NBS, 1990, 108 p.

11. *Korzhenevskaja Ju.V.* Akkumuljacionno-denudacionnye processy kak faktor cenozoobrazovanija (Na primere nekotoryh rastitelnykh soobshhestv Kryma): Diss. kand. biol. nauk (Accumulation-denudation processes as the factor of formation of cenoses (By the example of some plant communities of the Crimea), 1999, 19 p.

12. *Edigarjan A.A.* Struktura flory primorskih landshaftov abrazionnyh beregov Krymskogo poluostrova (The structure of the flora of seaside landscapes of abrasion shores of the Crimean Peninsula). *Bjulleten' GNBS,* 2008, No. 96, pp. 5–8.

13. *Mil'chakova N.A., Aleksandrov V.V., Bondareva L.V., Pankeeva T.V., and Chernysheva E.B.* Morskie ohranjaemye akvatorii Kryma (Marine protected areas of the Crimea). *Nauchnyj spravochnik.* N. Orianda, 2015, 312 p.

14. *Bondareva L.V.* Rastitel'nost' pribrezhnoj zony Geraklejskogo poluostrova (Vegetation of the coastal zone of the Heraclea Peninsula). *Sbornik nauchnyh trudov GNBS,* 2019, Vol. 149, pp. 41–54.

15. *Krylenko S.V. and Lukinyh A.I.* Morfologicheskie adaptacii rastenij k obitaniyu v usloviyah abrazionnyh beregov (Morphological adaptations of plants to habitation in the conditions of abrasion shores). Morya Rossii: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya. Tezisy dokladov Vserossijskoj nauchnoj kon-

ferencii. (Seas of Russia: fundamental and applied research. Abstracts of the All-Russian Scientific Conference), Sevastopol, 2019, pp. 218–220.

16. *Pikalova N.A. and Krylenko V.V.* Cenoflora beregovoj zony massiva Tuaphat (Cenoflora of the coastal zone of the Tuaphat massive). Materialy I Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii “Aktual'nye problemy geoekologii i prirodopol'zovaniya”. (Proc. of the I All-Russian scientific and practical conference "Actual problems of geoecology and nature management"), Krasnodar. 2020, pp. 143–146.

17. *Lukinyh A.I. and Krylenko S.V.* Sosudistye rastenija abrazionnogo berega severo-zapadnoj chasti chernomorskogo poberezh'ja Kavkaza (Vascular plants of the abrasion shore of the northwestern part of the Black Sea coast of the Caucasus). *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyh i estestvennyh nauk,* 2020, No. 7-1(46), pp. 5–14.

18. *Krylenko S.V. and Lukinyh A.I.* Harakteristiki sostava rastitel'nosti abrazionnogo berega severo-zapadnoj chasti chernomorskogo poberezh'ja Kavkaza (Characteristics of the vegetation composition of the abrasion shore of the northwestern part of the Black Sea coast of the Caucasus). *Vestnik Udmurtskogo Universiteta, Nauki o Zemle,* 2021, Vol. 31, No. 1, pp. 16–26.

19. https://www.plantarium.ru

20. http://www.theplantlist.org

21. *Agarkova-Ljah I.V.* Paragenetichni landshaftni kompleksi beregovoi zoni morja (na prikladi chornomors'kogo uzberezhzhja Krimu): Diss. kand. geogr. nauk (Paragenetic landscape complexes of the coastal zone of the sea (on the application of the Crimean coast of the Black Sea. Synopsis of Cand. geogr. sci. thesis)), Simferopol', 2006, 21 p.

УДК 504.3.054 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-84-91

ДИНАМИКА УРОВНЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОСНОВНЫМИ ГАЗОВЫМИ ПРИМЕСЯМИ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАССЕИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В Г. КАЗАНИ

А.Р. Шагидуллин

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ,
РФ, г. Казань, ул. Даурская, 28
E-mail: Artur.Shagidullin@tatar.ru

Изучается динамика уровней загрязнения атмосферного воздуха основными газовыми примесями совместно с комплексом метеорологических факторов, определяющих условия рассеивания или накопления примесей. Расчет проведен на основе данных измерений автоматических станций контроля загрязнения атмосферного воздуха. Фоновые показатели определены по данным метеостанции Казань-опорная. Приведена характеристика ветрового режима, рассчитаны потенциалы рассеивающей способности атмосферы за счет влияния комплекса метеофакторов. Определена динамика максимальных разовых и среднегодовых концентраций, рассчитаны индексы загрязнения атмосферы. Показано, что изменение комплексного индекса, который характеризует среднегодовые уровни загрязнения, происходит под влиянием изменений рассеивающей способности атмосферы.
Ключевые слова: загрязнение атмосферы, рассеивание, метеорологический потенциал, индекс загрязнения атмосферы

Поступила в редакцию: 10.05.2022. После доработки: 17.06.2022.

Введение. Атмосферный воздух промышленного города, как известно, подвергается загрязнению большим количеством вредных веществ. Для обеспечения экологической безопасности окружающей среды и населения в таких условиях необходимо осуществление инструментального мониторинга загрязнения воздуха.

Характер и пути распространения примесей в атмосфере определяется метеорологическими условиями, которые могут способствовать их эффективному рассеиванию или, наоборот, накоплению в приземных слоях атмосферы. Таким образом, данные мониторинга загрязнения воздушной среды для более полноценного анализа целесообразно дополнять наблюдаемыми характеристиками способности атмосферного воздуха к самоочищению.

Состав поступающих в атмосферу выбросов в различных населенных пунктах может быть специфичен, так как зависит от профиля размещенных на данной территории предприятий. Однако, существуют так называемые основные, повсеместно распространённые газовые примеси, к которым относятся оксиды азота (монооксид азота NO, диоксид азота – NO_2), диоксид серы (SO_2), оксид углерода (CO) [1]. Эти вещества выбрасываются в процессах сжигания ископаемых топливных ресурсов и потому присутствуют в выбросах автотранспорта и практически любого предприятия, таким образом, они во многом характеризуют общий уровень загрязнения.

Настоящая статья посвящена анализу динамики загрязнения атмосферного воздуха основными газовыми примесями и ее взаимосвязи с метеорологическими условиями для крупного промышленного города Казань (Россия, Республика Татарстан) с населением более 1 млн человек и действующими масштабными химическими и машиностроительными производствами.

Материалы и методы исследования. Особенности развития промышленности и более чем тысячелетняя история г. Казани сформировали его ключевую, для вопросов охраны атмосферного воздуха, особенность – рассредоточенность промышленных предприятий. Таким образом, ветровой режим, определяющий

направление распространения примесей играет важную роль.

Режим характерного на местности ветра, т.е. характер распределения вектора ветра $\overline{\boldsymbol{V_r}}$, может описываться с помощью роз ветров. Однако, розы ветров, описывающие распределение ветра по направлениям и одновременно по скоростям, имеют довольно громоздкий вид.

В аналитическом виде характер распределения векторов ветра может описываться в виде эллипсов рассеивания вектора ветра [2]. Такой эллипс, построенный в системе координат, где по осям откладывается скорости ветра в м/с, ограничивает область, внутри которой с заданной вероятностью P окажется вершина вектора ветра.

Кроме ветра на процессы рассеивания или накопления примесей оказывает влияние целый комплекс метеоусловий. Для описания этого влияния на данный момент наиболее распространенными в российских научных статьях и в то же время доступными по характеру исходных данных для расчета являются метеорологический потенциал (загрязнения) атмосферы – МПЗА [3, 4] (рассеивающую способность характеризует обратная величина 1/МПЗА) и усовершенствованный вариант метеорологического потенциала рассеивающей способности атмосферы – УМПА [5].

Для оценки динамики уровней загрязнения атмосферы принимались следующие величины: максимальная разовая концентрация $q_{мр}$, среднегодовая концентрация $q_{сг}$, стандартный индекс (СИ), наибольшая повторяемость превышений (НП), индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), рассчитанный по нескольким примесям комплексный индекс (КИЗА) [6].

Указанные выше параметры рассчитывались по данным измерений 4 автоматических станций контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан за 5-летний период (2016–2020 гг.). Для оценки фоновых значений метеопараметров привлекались данные метеостанции Казань-опорная (данные портала [7]). Эта метеостанция располагается в черте города, но на открытой подготовленной площадке, отвечающей требованиям к соответствующим наблюдениям.

Результаты и их обсуждение. На основе результатов обработки массивов данных измерений АСКЗА можно заключить следующее. Средняя скорость ветра по замерам станций в черте городской застройки ощутимо ниже соответствующих значений, фиксируемых на открытой местности [8], что объясняется влиянием застройки.

Все станции фиксируют снижение средней скорости ветра в летний период и повышение в зимний. Средние зимние скорости ветра фиксируются на уровне 97–118% от среднегодовых, летние – 62–96% от среднегодовых скоростей. Устойчивость ветра на большинстве станций выше в зимний период и снижается в переходные и летний периоды.

Преобладающими направлениями ветра за год и в холодный период в районе Казани являются: южное, западное и юго-западное. В летний период увеличивается повторяемость западных ветров.

На рис. 1 приведены эллипсы (P = 0,95) и результирующие векторы, построенные по данным за весь 5-летний период.

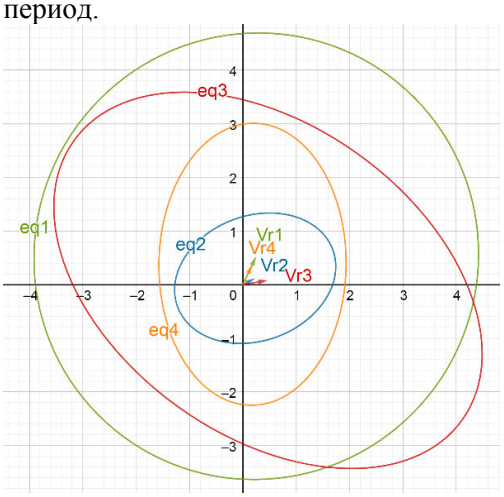


Рис. 1. Эллипсы рассеивания (eq) и результирующие вектора ветра (Vr) по данным измерений АСКЗА (индекс – номер АСКЗА, шкала – м/с)
Fig. 1. Scattering ellipses (eq) and resulting wind vectors (Vr) according to automatic air pollution monitoring stations (AAPMS) measurements (index - AAPMS number, scale - m/s)

Как видно из рис. 1 значительное влияние на рассеивание примесей оказывают местные условия, определяющие как скорости ветра, так и вероятность различных направлений. Следует отметить, что АСКЗА-1,3, фиксирующие более высокие скорости ветров, располагаются ближе к окраинам города, чем АСКЗА-2,4.

Полученные характеристики ветрового режима г. Казани являются основой для анализа наиболее вероятных условий рассеивания примесей за счет ветрового переноса. С учетом сложной планировки городской территории с множеством промышленных зон данные могут быть полезны для анализа вероятностей переноса примесей с тех или иных промышленных зон.

Как показали проведенные расчеты в целом для теплого периода характерно ухудшение условий рассеивания за счет снижения ветровых скоростей одновременно со снижением коэффициента устойчивости, что повышает вероятность увеличения уровней загрязнения воздуха в зонах жилой застройки, находящей близко к промышленным территориям.

Рассчитанные значения 1/МПЗА в сравнении с рассчитанными фоновыми значениями приведены в табл. 1.

Среднее значение 1/МПЗА по данным всех АСКЗА за 5 лет составляет 0,3.

Потенциал самоочищения атмосферы, полученный по данным АСКЗА, имеет меньшие значения в сравнении с фоновой станцией. Кратность отличия средних значений составляет 1,8–6,3. Наименьшие значения потенциалов получены для АСКЗА-2 и АСКЗА-4, расположенных ближе к центру города, наивысшие – для АСКЗА-1 и АСКЗА-3, расположенных на окраинных районах города. Максимальное значение коэффициента корреляции между данными АСКЗА и фоновыми составляет 0,57 (для АСКЗА-4).

Анализ значений факторов, принятых для расчета, показывает, что параметром, в большей степени определяющим значение потенциала самоочищения 1/МПЗА, является повторяемость застойных явлений (ветра 0-1 м/с). Значения этого фактора, рассчитанного по данным наблюдений АСКЗА, выше чем для фоновой станции, что объясняется влиянием застройки.

Результаты расчетов УМПА приведены в табл. 2.

Сходства УМПА, рассчитанного по данным АСКЗА и фоновой метеостанции, значительно выше, чем в случае 1/МПЗА.

Таблица 1. Результаты расчета метеорологического потенциала самоочищения атмосферы (1/МПЗА) для г. Казани

Метеостанция	2016	2017	2018	2019	2020	Среднее за 5 лет
АСКЗА-1	0,36	0,48	0,47	0,71	0,79	0,56
АСКЗА-2	0,07	-	0,13	0,22	0,22	0,16
АСКЗА-3	0,29	0,31	0,36	0,47	0,41	0,37
АСКЗА-4	0,15	0,35	0,21	0,36	0,27	0,27
Фон	1,01	1,11	0,95	1,03	0,97	1,01

Таблица 2. Результаты расчета усовершенствованного варианта метеорологического потенциала рассеивающей способности атмосферы (УМПА) для г. Казани

Метеостанция	2016	2017	2018	2019	2020	Среднее за 5 лет
АСКЗА-1	4,34	6,65	4,38	6,76	6,08	5,64
АСКЗА-2	4,37	-	3,32	5,91	7,44	5,26
АСКЗА-3	5,25	5,69	4,32	7,13	8,09	6,10
АСКЗА-4	4,24	6,14	4,11	7,54	6,66	5,74
Фон	4,94	5,42	3,98	5,61	6,76	5,34

Как показали проведенные расчеты, значения УМПА по данным наблюдений АСКЗА в наибольшей степени определяются коэффициентом теплообеспеченности [5]. При расчете УМПА по данным фоновой метеостанции значения данного коэффициента были в среднем ниже при больших вкладах коэффициентов ветра и осадков. Указанные особенности также объясняются влиянием застройки и городских источников тепла.

Значения коэффициента корреляции между данными АСКЗА и фоновыми составляет 0,66–0,95 (коэффициент корреляции не рассчитывался для АСКЗА-2 с учетом пропуска данных в 2017 г.), что соответствует хорошей корреляции.

Худшие условия рассеивания за исследованный период наблюдались в 2018 г. как по результатам расчета фонового уровня 1/МПЗА (табл. 1), так и по всем значениям УМПА (табл. 2), что было вызвано снижением теплообеспеченности и количества осадков.

В соответствии с градацией значений потенциалов [5] значения 1/МПЗА по данным фоновых наблюдений соответствуют буферной зоне, а по данным АСКЗА – неблагоприятным или крайне неблагоприятным условиям. В то же время, все средние многолетние значения УМПА соответствуют благоприятным условиям для рассеивания как по данным измерений автоматических станций, так и фоновой.

Как показали проведенные расчеты, местные условия могут существенно изменять локальную климатическую картину, увеличивая количество застойных явлений за счет влияния городской застройки. Это приводит к переходу метеорологического потенциала самоочищения атмосферы в градацию неблагоприятных условий. В то же время, учет коэффициента теплообеспеченности в УМПА существенно изменяет результат оценки способности атмосферы к самоочищению, согласно которому, не смотря на низкие скорости ветра, локальные условия соответствуют благоприятным для рассеивания вредных примесей.

Таким образом, в зависимости от выбранного метода оценки условия рассеивания в г. Казани могут характеризоваться как неблагоприятные или напротив благоприятные.

Уровни загрязнения воздуха основными газовыми примесями, вычисленные по результатам обработки данных измерений АСКЗА, представлены в табл. 3.

Как можно видеть в табл. 2 на станциях наиболее часто фиксируется превышение предельно допустимых максимальных разовых концентраций оксидов азота и оксидов углерода. Максимальная кратность превышений для оксида азота (или стандартный индекс – СИ) был зафиксирован в 2018 г. на АСКЗА-2 и составил 10,5, для диоксида азота – в 2016 г. на АСКЗА-2 и составил 3,0. Превышений максимальных разовых концентраций диоксида серы за рассматриваемый период наблюдения зафиксировано не было. Для оксида углерода максимальный СИ получен по результатам измерений в 2016 г. на АСКЗА-3 и равен 18,3.

За исследуемый период среднегодовые концентрации превышали установленные $ПДК_{с.г.}$ (для диоксида серы в связи с отсутствием $ПДК_{с.г.}$ использовалась $ПДК_{с.с.}$) для диоксида азота (на АСКЗА-3 в 2016, 2018, 2019 гг., на АСКЗА-4 в 2017, 2018 гг.), оксида азота (на АСКЗА-3 в 2017 г.). На АСКЗА-1 и АСКЗА-2 превышений предельно допустимых среднегодовых концентраций зафиксировано не было.

Выраженные в долях $ПДК_{с.г.}$ наибольшие среднегодовые концентрации наблюдались практически в каждый период времени и на каждой станции для диоксида азота. Причем максимальные уровни загрязнения фиксировались на каждой станции в 2018 г., для которого были получены наименьшие в ряду потенциалы самоочищения атмосферного воздуха 1/МПЗА, УМПА. В целом, ход изменения среднегодовых концентраций диоксида азота на всех станциях схож, что может объясняться изменением климатических условий рассеивания при относительно постоянном уровне выбросов.

Результаты расчета СИ, НП, ИЗА и КИЗА приведены в табл. 4.

Наибольшая повторяемость (НП) превышений $ПДК_{м.р.}$ для оксида азота наблюдалась на АСКЗА-3 в 2017 г. (значение – 1,3), диоксида азота – на АСКЗА-3 в 2018 г. (значение – 8,9), оксида углерода – на АСКЗА-1 в 2020 г. (значение – 2,7).

Наибольшее значения индекса загрязнения атмосферы (ИЗА) для оксида азота наблюдалось в 2017 г. (значение – 0,60), диоксида азота – в 2018 г. (значение – 1,66), диоксида серы и оксида углерода – в 2016 г. (значения – 0,34 и 0,32 соответственно).

Таблица 3. Результаты мониторинга АСКЗА г. Казани в 2016–2020 гг. (с.г. – среднегодовые, м.р. – максимальные разовые концентрации)

Год	NO		NO_2		SO_2		CO	
	с.г.	м.р.	с.г.	м.р.	с.г.	м.р.	с.г.	м.р.
ПДК	0,06	0,4	0,04	0,2	0,05	0,5	3	5
АСКЗА-1								
2016	0,006	**1,74**	0,024	**0,49**	0,002	0,13	0,752	**60,00**
2017	0,004	0,25	0,012	**0,22**	0,001	0,01	0,313	2,20
2018	0,009	**0,48**	0,030	**0,27**	0,001	0,01	0,351	**10,40**
2019	0,009	0,21	0,012	0,13	0,001	0,00	0,351	**12,00**
2020	0,007	0,22	0,008	0,07	0,001	0,01	0,694	**15,70**
АСКЗА-2								
2016	0,006	**0,89**	0,025	**0,60**	0,001	0,03	0,324	**31,30**
2017	0,006	**0,69**	0,020	**0,30**	0,005	0,04	0,347	**43,30**
2018	0,018	**4,22**	0,039	**0,59**	0,005	0,03	0,383	**35,00**
2019	0,010	**1,92**	0,025	**0,23**	0,004	0,05	0,391	**44,40**
2020	0,010	**0,98**	0,029	**0,50**	0,011	0,19	0,260	**48,30**
АСКЗА-3								
2016	0,030	0,33	**0,059**	**0,28**	0,010	0,04	1,217	**91,50**
2017	**0,126**	**1,01**	0,036	**0,20**	0,026	0,05	0,619	**6,00**
2018	0,050	**1,21**	**0,114**	**0,58**	0,007	0,04	0,353	**55,30**
2019	0,039	**0,77**	**0,052**	**0,34**	0,004	0,17	0,766	**81,10**
2020	0,022	**0,86**	0,034	**0,25**	0,005	0,03	0,556	**22,90**
АСКЗА-4								
2016	0,018	0,24	0,039	**0,20**	**-**	0,08	0,878	**49,10**
2017	0,008	0,27	**0,041**	**0,51**	0,013	0,07	0,246	2,30
2018	0,017	**0,65**	**0,083**	**0,47**	0,007	0,03	0,326	3,40
2019	0,003	0,22	0,026	0,15	0,006	0,02	0,446	4,40
2020	0,024	**0,73**	0,032	**0,36**	0,013	0,06	0,243	4,50

Таблица 4. Результаты расчета СИ, НП и ИЗА для г. Казани за период 2016–2020 гг.

Вещество	Параметр	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
NO	ИЗА	0,25	0,60	0,39	0,25	0,26
	СИ	4,3	2,5	10,5	4,8	2,5
	НП	0,1	1,3	1,0	0,1	0,4
NO_2	ИЗА	0,92	0,68	1,66	0,72	0,64
	СИ	3,0	2,5	2,9	1,7	2,5
	НП	1,2	0,1	8,9	1,0	1,4
SO_2	ИЗА	0,34	0,22	0,10	0,07	0,15
	СИ	0,3	0,1	0,1	0,3	0,4
	НП	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CO	ИЗА	0,32	0,17	0,16	0,21	0,19
	СИ	18,3	8,7	11,1	16,2	9,7
	НП	2,1	0,2	1,2	2,1	2,7
Итого по 4 веществам	КИЗА4	1,83	1,67	2,31	1,25	1,25
	СИ	18,3	8,7	11,1	16,2	9,7
	НП	2,1	1,3	8,9	2,1	2,7

Максимальное значение КИЗА4 (сумма ИЗА для четырех примесей) получено в 2018 г. с наихудшими за исследуемый период условиями рассеивания примесей.

Идентификация степеней загрязнения атмосферы как пониженная, повышенная, высокая или очень высокая по данным табл. 4 в соответствии с градацией параметров СИ, НП, ИЗА, приведенной в [1], не представляется возможной, т.к. перечень анализируемых веществ ограничен лишь четырьмя основными газовыми примесями. Однако, если учесть, что СИ и НП попадают в различные градации, то динамику уровней загрязнения следует оценивать по параметру КИЗА4. Таким образом, уровни загрязнения в период 2016–2020 гг. следует расположить в порядке убывания следующим образом: 2018 г. > 2016 г. > 2017 г. > 2019 г. = 2020 г.

Как указывалось выше, наблюдаемые уровни загрязнения воздуха одновременно зависят от интенсивности поступления выбросов из источников и условий рассеивания. При относительно постоянном уровне выбросов должна наблюдаться корреляция между комплексными величинами, отражающими условия рассеивания и уровни загрязнения. Так как рассчитанные выше 1/МПЗА и УМПА отражают среднегодовые условия рассеивания, сопоставление следует проводить с КИЗА4, рассчитанным по среднегодовым концентрациям (рис. 2, 3). Сравнения приводится со средними значениями потенциалов по данным АСКЗА.

Для пары КИЗА4 - 1/МПЗА коэффициент корреляции $R_{1/МПЗА}$ = -0,76 (высокая сила связи), для пары КИЗА4 - УМПА – $R_{УМПА}$ = -0,95 (очень высокая сила связи). Отрицательный знак коэффициентов корреляции связан с разнонаправленностью сравниваемых величин, сила корреляции определяется модулем R. Таким образом, УМПА имеет более тесную связь с КИЗА4.

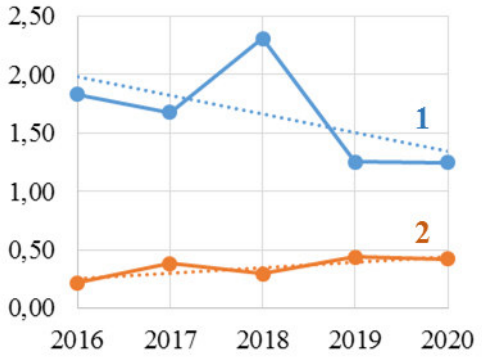


Рис. 2. Динамика КИЗА4 (1) в сравнении с 1/МПЗА (2)

Fig. 2. Dynamics of the complex pollution index (1) in comparison with the inverse meteorological potential of atmospheric pollution (2)

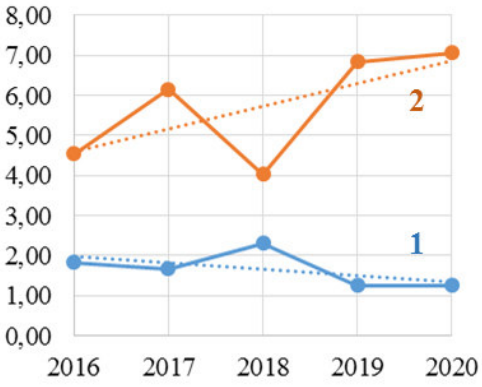


Рис. 3. Динамика КИЗА4 (1) в сравнении с УМПА (2)

Fig. 3. Dynamics of the complex pollution index (1) in comparison with the improved atmospheric scattering power potential (2)

Заключение. Таким образом, общий уровень загрязнения в г. Казани за период 2016–2020 гг. имеет тренд на снижение. Колебания среднегодовых уровней хорошо объясняются колебаниями метеоусловий, способствующих накоплению или рассеивания примесей. Наилучшую корреляцию с наблюдаемыми уровнями загрязнения обеспечивает усовершенствованный метеорологический потенциал атмосферы (УМПА). Наивысшие средние уровни загрязнения за исследуемый период наблюдались в

2018 г., что было вызвано снижением рассеивающей способности атмосферы за счет уменьшения теплообеспеченности и количества осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *РД 52.04.186-89*. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. 1991. 573 с.

2. *Гутерман И.Г.* Распределение ветра над северным полушарием. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 252 с.

3. *Селегей Т.С., Юрченко И.П.* Потенциал рассеивающей способности атмосферы // География и природные ресурсы. 1990. № 2. С. 132–137.

4. *Рекомендации* по определению метеорологического потенциала атмосферы Сибирского экономического района / Отв. исполнитель Т.С. Селегей. Новосибирск. 1987. 132 с.

5. *Отчет* о научно-исследовательской работе по теме 1.4.3.15 «Разработать усовершенствованный комплексный метеорологический показатель рассеивающей способности атмосферы (на примере территории Западной Сибири) (закл.). Новосибирск: ФБГУ «СибНИГМИ». 2014. 132 с.

6. *РД 52.04.667-2005*. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию. 2005. 52 с.

7. http://www.pogodaiklimat.ru/ (дата обращения: 04.05.2022).

8. *Переведенцев Ю.П., Шерстюков Б.Г., Наумов Э.П., Верещагин М.А., Шанталинский К.М.* Климатические условия и ресурсы Республики Татарстан. Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та. 2008. 288 с.

DYNAMICS OF LEVELS OF POLLUTION WITH THE MAIN GASEOUS IMPURITIES AND INDICATORS OF THE SCATTERING POWER OF ATMOSPHERIC AIR IN KAZAN

A.R. Shagidullin

Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, RF, Kazan, Daurskaya St., 28

Dynamics of levels of atmospheric air pollution in Kazan with the main gaseous impurities along with some meteorological factors that determine the conditions for the dispersion or accumulation of impurities is studied. The calculation is based on measurement data from automatic air pollution monitoring stations. Background indicators are determined using data from the Kazan-Opornaya weather station. Characteristics of the wind regime are given, potentials of the scattering power of the atmosphere under the impact of a complex of meteorological factors are calculated. Dynamics of maximum one-time and average annual concentrations is determined; air pollution indices are calculated. The change in the complex index, characterizing the average annual levels of pollution is shown to occur under the influence of changes in the scattering power of the atmosphere.

Keywords: atmospheric pollution, dispersion, meteorological potential, atmospheric pollution index

REFERENCES

1. *RD 52.04.186-89* (USSR standard), Moscow: Goskomgidromet SSSR, 1991.

2. *Guterman I.G.* Raspredelenie vetra nad severnym polushariem (Wind distribution over the northern hemisphere), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965, 252 p.

3. *Selegej T.S. and YUrchenko I.P.* Potencial rasseivayushchej sposobnosti atmosfery (Atmospheric scattering potential). *Geografiya i prirodnye resursy*, 1990, No. 2, pp.132–137.

4. *Selegej T.S.* Rekomendacii po opredeleniyu meteorologicheskogo potenciala atmosfery Sibirskogo ekonomicheskogo rajona (Recommendations for determining the meteorological potential of the atmosphere of the Siberian economic region), Novosibirsk: FBGU ”Sib-NIGMI”, 1987, 132 p.

5. *Selegej T.S.* Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote po teme 1.4.3.15 «Razrabotat' usovershenstvo-vannyj kompleksnyj meteorologiche-skij pokazatel' rasseivayushchej sposobnosti atmosfery (na primere ter-ritorii Zapadnoj Sibiri) (zaklyuchitel'nyj) (Report on the research work on the topic 1.4.3.15 “Develop an improved complex meteorological indicator of the scattering power of the atmosphere (on the example of the territory of Western Siberia) (final)), Novosibirsk: FBGU ”Sib-NIGMI”, 2014, 132 p.

6. *RD 52.04.667-2005* (Russian standard), Moscow: Rosgidromet, 2006.

7. http://www.pogodaiklimat.ru/

8. *Perevedencev YU.P., SHerstyukov B.G., Naumov E.P., Vereshchagin M.A., and SHantalinskij K.M.* Klimaticheskie usloviya i resursy Respubliki Tatarstan (Climatic conditions and resources of the Republic of Tatarstan), Kazan': Izd-vo Kazansk. gos. un-ta, 2008, 288 p.

УДК 519.8 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-92-100

О СВОЙСТВЕ ИДЕМПОТЕНТНОСТИ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

А.В. Скатков, Ю.В. Доронина, Д.В. Моисеев

Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: dmitriymoiseev@mail.ru

Статья посвящена вопросу оценивания свойства повторяемости на основе анализа статистической устойчивости информационного продукта идемпотентной системы контроля окружающей среды. Предложено понятие системы контроля информационной среды как составляющей части системы контроля окружающей среды. Показано, что на основе представленной обобщенной структурно-функциональной схемы идемпотентной системы контроля окружающей среды возможно формировать статистически устойчивые решения, а на основе оценок устойчивости результата прогнозировать требуемые объемы данных и статистически зависимую изменчивость среды (информационной, как части окружающей среды). Предложен ряд определений, касающихся уточнения понятий систем контроля информационной среды.

Ключевые слова: информационная среда, система контроля окружающей среды, информационная экология

Поступила в редакцию: 20.04.2022.

Введение. В настоящее время системы контроля окружающей среды (СКОС) представляют собой важнейшее средство анализа состояния надсистемы критически важных объектов [1].

Терминологическое обоснование понятийного аппарата СКОС в большинстве случаев касается программно-аппаратной части и часто относится к экологическому или гидрометеорологическому контролю [2, 3].

Например, контроль в области охраны окружающей среды (экологический контроль) – определяется в [2, 3] как система мер, направленная на предотвращение, выявление и пресечение нарушения законодательства в области охраны окружающей среды, обеспечение соблюдения субъектами хозяйственной и иной деятельности требований, в том числе нормативов и нормативных документов, в области охраны окружающей среды.

Как правило, результат функционирования СКОС представляет собой информационный продукт, которому предъявляется ряд квалиметрических требований, в связи с чем вводятся определенные метрики: достоверность, точность, статистическая устойчивость и другие. К сожалению, среди этих требований отсутствует в явном виде требование обеспечения свойства идемпотентности, которое имеет важное значение в системном анализе. Как известно, это свойство обеспечивает необходимый уровень повторяемости результата, что позволяет выполнить качественный анализ результата измерений и мониторинга, перейти к построению моделей, решать задачи прогнозирования и принятия решений [4, 5]. Ясно, что свойство идемпотентности зависит от множества обстоятельств. В первую очередь, оно диктуется свойствами объекта, определяется отрезком времени анализа и квалификацией специалистов-аналитиков, участвующих в процессе получения (мониторинга) и первичной обработки данных.

Потеря должного уровня идемпотентности в системах и процессах свя-

зано с множеством причин, среди которых следует выделить:

- деструктивные воздействия внешней среды;
- деградационные процессы в самом объекте;
- несовершенство информационно-измерительных систем, методов, методик съема и регистрации данных.

При прочих равных условиях подчеркнем две основные причины нарушения идемпотентности, которые, на наш взгляд, необходимо учесть:

1) деструктивные воздействия,

2) отсутствие режима реального времени.

Так как современные СКОС реализуются с привлечением информационных технологий, то основной причиной нарушения идемпотентности мориторируемых объектов является вредоносное воздействие на информационную структуру. Своевременное обнаружение событий такого рода, на наш взгляд, один из важнейших путей развития функциональных характеристик СКОС и обеспечения информационной безопасности, которая есть в ряде документов.

Целью статьи является расширение понятий систем контроля окружающей среды, введение в рассмотрение нового класса идемпотентных систем контроля окружающей среды и обсуждение системных взаимодействий в информационной среде.

Сформулируем понятие идемпотентности информационного продукта СКОС.

Идемпотентность – свойство СКОС при повторном применении к объекту контроля давать тот же результат (информационный продукт), что и при первом.

На рис. 1 приведена схема идемпотентной СКОС.

Изображенная на рис. 1 укрупненная структурная схема организации систем контроля окружающей среды включает наиболее важные области: системы экологического мониторинга, системы мониторинга инфраструктуры критических объектов. Осуществимость свойства информационного продукта СКОС – идемпотентности является частью понятия «идемпотентной» СКОС (ИСКОС).

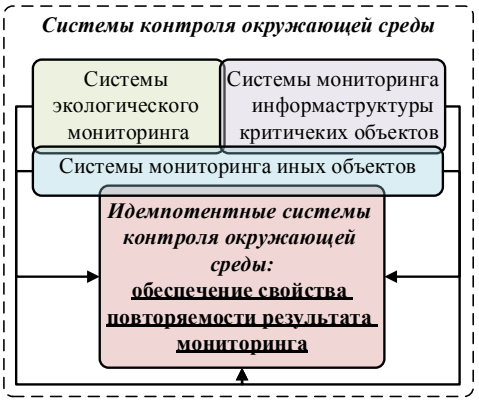


Рис. 1. Схема идемпотентной системы контроля окружающей среды
Fig. 1. Diagram of an idempotent environmental control system

Анализ состояния проблемы. В работе [3] указывается на распространение в настоящее время деструктивных явлений в информационном пространстве, классифицированных в этой работе как информационный вандализм, криминал, терроризм (ИВ, ИК, ИТ), там же ставятся задачи уточнения понятия и категорий, характерных для ИВ, ИК, ИТ, а также целесообразности систематизации возможных методов, средств и объектов.

В [6] анализируется национальная безопасность, в том числе в информационном пространстве. Несмотря на критические аспекты информационного взаимодействия, приведенные в данной работе, их влияние на экологичность информационного пространства очевидно.

Экология интеллектуальных систем тесно связана с системой знаний о ноогенезе, информационной экологией и информационной гигиеной [4]. Еремин А.Л. подчеркивает, что «при несоответствии между планируемым и реальным использованием информации, происхо-

дят неполадки в области информационной экологии». В России информационная экология как дисциплина входит в состав специальных профессиональных дисциплин подготовки студентов вузов культуры и искусств [7–10], что подразумевает духовные снования качества жизни и гуманитарно-философский взгляд на изучаемую проблему.

Следовательно, современная активная информационная среда, характеризующаяся сильнейшим внешним влиянием на психику человека в совокупности с его деятельностью, связанной с информатизацией процессов посредством компьютерных информационных систем (КИС), позволит понять принципы построения и анализа экологичных систем [11–14].

Подобный тренд, связанный с оцениванием важности влияния информационной среды на человека связан с не менее важным фактором качества и целостности информации в КИС. Исследование качества моделей реализуется на основе квалиметрического анализа - мощного направления, определяющего методы анализа статистических характеристик реализации моделей и, как следствие – систем в целом [1–3, 15-16]. Существующие исследования связаны, как правило с формулировкой общих и частных параметров квалиметрического анализа, не касаясь свойств отдельных классов систем. Таким образом, исследования, направленные на рассмотрение нового класса идемпотентных систем контроля окружающей среды и обсуждение системных взаимодействий в информационной среде, являются актуальными.

Проблема оценивания уровня экологичности компьютерных информационных систем в активной среде. Наряду с комплексами датчиков различных показателей среды (например, экологический контроль), в настоящее время представляется важным контролировать информационную среду, которая все активнее представляет собой влияющий фактор не только на социального, психологического, но и технологического и инфраструктурного типов.

Одним из направлений анализа взаимодействия человека и информационной среды является информационная экология. В исследованиях [5, 6] на основе принципа накопления знаний об информации и объединения их в систему формулируется неизбежность образования нового качества этой системы, что, в свою очередь, формирует новые качества информационных систем. Конец 2-го тысячелетия характеризовался такими терминами, как «информационная революция», «ноосфера», «теория информации», «четвертая власть» – средства массовой информации», «информационное загрязнение». В работе [5] введены такие понятия как информационная анархия – беспорядочное, сумбурное, хаотичное, бессистемное (не структурированное, не последовательное) производство и распространение, получение и хранение информации [5].

В целом, информационная экология – это наука, изучающая закономерности влияния информации на формирование и функционирование человека, человеческих сообществ и человечества в целом, на индивидуальные и общественные взаимоотношения с окружающей информационной средой, а также межличностные и межгрупповые информационные взаимодействия [3].

Приведенные факторы свидетельствуют о трансформации информационного пространства из информационного обеспечения компьютерных систем в активную информационную среду, которая становится жизненно необходимой для социума.

Разрешение этой проблемы приводит к необходимости классификации по различным координатам.

На рис. 2 представлена классификация уровней экологичности КИС, где UiFjZk – индексы классов: и Ui- информационная избыточность, $i \in I$; Fj- фильтрация данных, $j \in J$; Zk- значимость взаимодействия оператора и системы, $k \in K$.

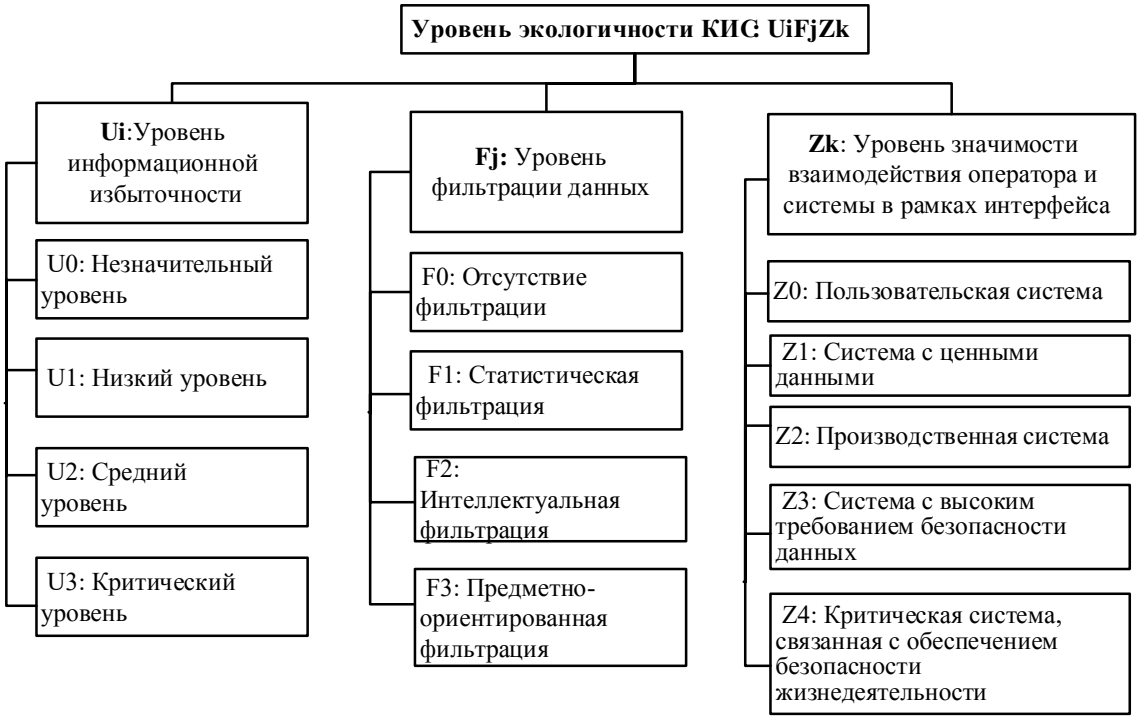


Рис. 2. Схема классификации уровней экологичности компьютерных информационных систем как идентификация объектов идемпотентных СКИС
Fig. 2. Scheme of classification of levels of environmental friendliness of computer information systems as identification of objects of idempotent SCIS

Описание экологичности КИС в предложенной форме будет иметь вид, например, U0F2Z4 – незначительная информационная избыточность, наличие интеллектуальной фильтрации данных, высокая критичность системы, связанной с обеспечением безопасности жизнедеятельности.

При оценивании информационной экологичности КИС предлагается (в упрощенном виде) понимать совокупность трех составляющих:

L_{I++} – уровень информационной избыточности (например, если в КИС предполагается большой поток данных без предварительного анализа);

L_{I+-} – уровень фильтрации данных (например, 1 – отсутствие фильтрации, 2 – статистическая фильтрация, основанная на хранении агрегированных данных, 3 – интеллектуальная фильтрация и т.п.);

$L_{I\sim}$ – уровень значимости взаимодействия оператора и системы в рамках интерфейса (например, 1 – пользовательская система, 2 – производственная система, 3 – система с ценными данными, 4 – система с высоким требованием безопасности данных, 5 – критическая система, связанная с обеспечением безопасности жизнедеятельности).

Таким образом, общее выражение уровня экологичности КИС возможно определить как взаимосвязь этих составляющих в рамках некоторого функционала φ

$$L_{IE} = \varphi(L_{I++}, L_{I+-}, L_{I\sim}). \quad (1)$$

Если вторая и третья составляющие выражения (1) могут входить в это выражение в качестве слагаемых, то первый элемент (L_{I++}) отражает требование экологичности или критичность системы к возможной избыточности. Предлагается использовать его как коэффициент усиления критичности оценки уровня экологичности КИС, вы-

раженный объемом данных в единицу времени (например, 0 – КБ в час, 1 – КБ в минуту, 2 – МБ в час, 3 – МБ в минуту и т.п.)

$$L_{IE} = L_{I++}(L_{I+-} + L_{I\sim}) . \quad (2)$$

Проведем оценку экологичности КИС при следующих исходных данных: объем данных мониторинга погодных условий на полигоне бытовых отходов при анализе критического загрязнения и возгорания соответствует оценке: МБ в минуту (данные о силе и направлении ветра, данные о виде и степени опасности веществ в воздухе и почве, данные о близлежащих постройках и т.п); при этом L_{I+-}= 1, но требуется 3; $L_{I\sim}$=5. В этом случае получим $L_{IE} = 3 \cdot (1+5) = 18$ при требуемых $L_{IE} = 3 \cdot (3+5) = 24.$

Таким образом, предложена система классификации, которая позволяет разрешить проблему оценивания и идентификации КИО уровня идемпотентности и получено количественное выражение экологичности КИС, что позволило оценивать и сравнивать уровни информационной напряженности в заданной предметной области.

Системы контроля состояния информационной среды как элемент СКОС. На основе содержательного подхода обеспечения идемпотентности в рамках рассмотрения нового класса систем, которые предлагается назвать СКИС, возможно получить другие оценки экологичности, а также сформулировать особенности определения и принципы построения системы контроля информационной среды (СКИС), рис. 3.

Особенно важным предполагается формулировка программных документов методологического и правового регулирования как формирования экологичной информационной среды в целом, так и принципов оценивания качества такой среды.



Рис. 3. Обобщенная организационная схема СКИС
Fig. 3. The generalized organizational scheme of SCIS

К основным компонентам СКИС предлагается относить:

(1) Подсистему мониторинга и фиксации данных, касающихся критических объектов информационной среды;
(2) Подсистему оценивания и прогнозирования информационных угроз критических инфраструктурных объектов;
(3) Подсистему оценки качества прогнозирования;
(4) Подсистему оперативного реагирования на разворачивающиеся информационные атаки;
(5) Подсистему стратегического планирования защиты от информационных угроз;
(6) Подсистему оценивания последствий и нанесенного ущерба развернутых информационных атак;
(7) Подсистему принятия решений по реструктурированию существующей критической инфраструктуры с целью повышения устойчивости к разворачивающимся информационным атакам.

Таким образом, в современном мире глобальных информационных вызовов, обеспечение информационной безопасности связано, в первую очередь, с защитой критических объектов информационной среды, обеспечением инфор-

мационной экологии этой среды, что требует понимания и создания принципиально нового подхода к формированию СКИС.

Сформулируем ряд определений.

Система контроля информационной среды (СКИС) критической инфраструктуры – это комплекс программного, аппаратного, информационного, математического, правового, методологического обеспечения, позволяющих собирать, фиксировать, идентифицировать, обрабатывать, визуализировать, хранить, прогнозировать, моделировать и управлять информационными потоками критической инфраструктуры объектов жизнедеятельности человека.

Глобальная система контроля информационной среды (ГСКИС) критической инфраструктуры – это совокупность комплексов программного, аппаратного, информационного, математического, правового, методологического обеспечения, позволяющих собирать, фиксировать, идентифицировать, обрабатывать, визуализировать, хранить, прогнозировать, моделировать и управлять информационными потоками глобальной критической инфраструктуры регионального (ГрСКИС) или всероссийского уровня (ГСКИС).

Принципы организации и построения ГрСКИС и ГКИС основываются на каскадно-иерархическом подходе [11–13].

При исследовании информационного продукта СКИС возникает проблема обеспечения идемпотентности.

Типовой каркас структурной схемы идемпотентной СКОС. На основе предложенных терминологических аспектов, позволяющих уточнить описание СКОС, а именно: сформулированного определение ИСОК и СКИС, на рис. 4 предложен типовой каркас структурной схемы идемпотентной СКОС с учетом подсистемы СКИС.



Рис. 4. Обобщенная структурно-функциональная схема идемпотентной СКОС с учетом СКИС
Fig. 4. Generalized structural and functional scheme of idempotent SKOS into account SCIS

На рис. 4 можно видеть, что базовыми подсистемами в ней являются подсистема наблюдения (мониторинга) и фиксации данных, подсистема состояния окружающей среды и подсистема регулирования (управления) окружающей среды.

Отметим, что все структурные элементы СКОС могут быть отнесены и к информационным процессам в информационной среде. Например, в подсистеме оценивания состояния окружающей среды в приложении к среде информационной, модуль оценивания фактического состояния среды может содержать методику, сформулированную в форме (1)–(2), как оценку экологичности ИС.

Заключение. Предложено уточнение терминологии СКОС на основе понятия идемпотентности как свойства повторяемости и прогнозируемости результата мониторинга; сформулировано определение идемпотентной СКОС. Оценивание свойства повторяемости возможно на основе анализа статистической устойчивости информационного продукта ИСКОС. Предложено понятие СКИС как составляющей части СКОС. На основе представленной обобщенной структурно-функциональной схемы ИСКОС с учетом СКИС возможно формировать статистически устойчивые решения, а на основе оценок устойчивости результата прогнозировать требуемые объемы данных и статистически зависимую изменчивость среды (информационной, как части окружающей среды).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гайский В.А.* Надежность и точность систем контроля природной среды. Часть 3 // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 4 (42). С. 111–118. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-4-111-118

2. *Юсупов Р.М., Шишкин В.М.* Информационная безопасность, кибербезопасность и смежные понятия: cyber security vs информационной безопасности // Информационное противодействие угрозам терроризма. 2013. Т. 21, № 21. С. 27–35. http://elibrary.ru/item.asp?id=21999013

3. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

4. *Рябовая В.О., Доронина Ю.В.* Методы реструктуризации циклических систем: монография. Севастополь: СевГУ, 2018. 200 с.

5. *Маслов В.П., Колокольцов В.Н.* Идемпотентный анализ и его применение в оптимальном управлении. М.: Физматлит, 1994. 144 с.

6. *Литвинов Г.Л., Маслов В.П., Шпиз Г.Б.* Идемпотентный функциональный анализ. Алгебраический подход // Матем. заметки. 2001. Т. 69 (5). С. 758–797.

7. *Юсупов Р.М., Заболотский В.П.* Научно-методологические основы информатизации: РАН, СПб. ин-т информатики и автоматизации. СПб.: Наука, 2000. 456 с.

8. *Еремин А.Л.* Ноогенез и теория интеллекта. Краснодар: СовКуб, 2005. 356 с.

9. *Еремин А.Л.* Мировой разум: технические характеристики и интеллект-технологиии // Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные процессы в высшей школе». Краснодар: КубГТУ, 2010. С. 187–189.

10. *Осипов В.Ю., Юсупов Р.М.* Информационный вандализм, криминал и терроризм как современные угрозы обществу // Труды СПИИРАН. 2009. Вып. 8. С. 34–45.

11. *Парахонский А.П.* Информационная экология // Успехи современного естествознания. 2011. № 11. С. 88–89; URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=29154 (дата обращения: 07.03.2022).

12. *Доронина Ю.В., Маловик К.Н.* Влияние экологичности информацион-

ной системы на качество жизни // Качество и жизнь. 2018. № 1 (17). С. 70–77.

13. *Петрова Е.В.* Информационная экология в цифровой среде // Экономические и социально-гуманитарные исследования. 2019. № 3 (23). С. 103–108. doi:10.24151/2409-1073-2019-3-103-108

14. *Скатков А.В., Балакирева И.А., Шевченко В.И.* Технологии системотехнических решений: монография. М.: Изд-во Спутник+. 2016. 267 с.

15. *Скатков А.В., Брюховецкий А.А., Моисеев Д.В., Шевченко В.И.* Оценивание состояний природно-технических систем на основе динамической кластеризации // Системы контроля окружающей среды. 2020. Вып. № 1 (39). С. 135–144. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-1-135-144

16. *Доронина Ю.В., Скатков А.В.,* Особенности квалиметрического анализа полимодельных комплексов с переменной топологией при исследовании сложных технических систем // Вестник Томского гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2021. № 56. С. 49–58. DOI: 10.17223/19988605/56/6

ON THE IDEMPOTENCY PROPERTY OF ENVIRONMENTAL CONTROL SYSTEMS

A.V. Skatkov, Yu.V. Doronina, D.V. Moiseev

Sevastopol State University,
RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33
E-mail: dmitriymoiseev@mail.ru

The article focuses on the issue of assessing the repeatability property based on the analysis of the statistical stability of the information product of an idempotent environmental control system. The concept of the information environment control system as a component of the environmental control system is proposed. It is shown that on the basis of the presented generalized structural and functional scheme of an idempotent environmental control system, it is possible to form statistically stable solutions, and on the basis of estimates of the stability of the result, it is possible to predict the required data volumes and statistically dependent variability of the environment (information, as part of the environment). A number of definitions concerning the clarification of the concepts of information environment control systems are proposed.

Keywords: information environment, environmental control system, information ecology

REFERENCES

1. *Gajskij V.A.* Nadezhnost' i tochnost' sistem kontrolja prirodnoj sredy. Chast' 3 (Reliability and accuracy of environmental control systems. Part 3). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2020, No. 4 (42), pp. 111–118. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-4-111-118

2. *Jusupov R.M. and Shishkin V.M.* Informacionnaja bezopasnost', kiberbezopasnost' i smezhnye ponjatija: cyber security vs informacionnoj bezopasnosti (Information security, cybersecurity and related concepts: cyber security vs information security). *Informacionnoe protivodejstvie ugrozam terrorizma*, 2013, Vol. 21, No. 21, pp. 27–35.

3. *Ohtilev M.Ju., Sokolov B.V.,and Jusupov R.M.* Intellektual'nye tehnologii monitoringa i upravlenija strukturnoj dinamikoj slozhnyh tehnicheskih ob'ektov (Intelligent technologies for monitoring and controlling the structural dynamics of complex technical objects), Moscow: Nauka, 2006, 410 p.

4. *Rjabovaja V.O. and Doronina Ju.V.* Metody restrukturizacii ciklicheskih system (Methods of restructuring cyclic systems. Monograph). Sevastopol': SevGU, 2018, 200 p.

5. *Maslov V.P. and Kolokol'cov V.N.* Idempotentnyj analiz i ego primenenie v optimal'nom upravlenii (Idempotent analysis and its application in optimal management), Moscow: Fizmatlit, 1994, 144 p.

6. *Litvinov G.L., Maslov V.P., and Shpiz G.B.* Idempotentnyj funkcional'nyj analiz. Algebraicheskij podhod (Idempotent functional analysis. Algebraic approach). *Matem. zametki*, 2001, Vol. 69 (5), pp. 758–797.

7. *Jusupov R.M. and Zabolotskij V.P.* Nauchno-metodologicheskie osnovy informatizacii: RAN (Scientific and methodological foundations of Informatization: RAS), Saint-Petersburg. in-t informatiki i avtomatizacii, Saint-Petersburg: Nauka, 2000, 456 p.

8. *Eremin A.L.* Noogenez i teorija intellekta (Noogenesis and theory of intelligence). Krasnodar: SovKub, 2005, 356 p.

9. *Eremin A.L.* Mirovoj razum: tehnicheskie harakteristiki i intellekt-tehnologiii (The world mind: technical characteristics and intelligence technologies) Materialy XVI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii ”Innovacionnye processy v vysshej shkole”. Krasnodar: KubGTU, 2010, pp. 187–189.

10. *Osipov V.Ju. and Jusupov R.M.* Informacionnyj vandalizm, kriminal i terrorizm kak sovremennye ugrozy obshhestvu (Information vandalism, crime and terrorism as modern threats to society). *Trudy SPIIRAN*, 2009, Vol. 8, pp. 34–45.

11. *Parahonskij A.P.* Informacionnaja jekologija. *Uspehi sovremennogo estestvoznanija*, 2011, No. 11, pp. 88–89. URL:https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=29154 (07.03.2022).

12. *Doronina Ju.V. and Malovik K.N.* Vlijanie jekologichnosti informacionnoj sistemy na kachestvo zhizni (The impact of environmental friendliness of the information system on the quality of life). *Kachestvo i zhizn'*, 2018, No. 1 (17), pp. 70–77.

13. *Petrova E.V.* Informacionnaja jekologija v cifrovoj srede (Information ecology in the digital environment). *Jekonomicheskie i social'no-gumanitarnye issledovanija*, 2019, No. 3 (23), pp. 103–108. doi:10.24151/2409-1073-2019-3-103-108

14. *Skatkov A.V., Balakireva I.A., and Shevchenko V.I.* Tehnologii sistemotehnicheskih reshenij (Technologies of system engineering solutions), Moskwa: Izd-vo “Sputnik+”, 2016, 267 p.

15. *Skatkov A.V., Brjuhoveckij A.A., Moiseev D.V., and Shevchenko V.I.* Ocenivanie sostojanij prirodno-tehnicheskih sistem na osnove dinamicheskoj klasterizacii (Assessment of the states of natural and technical systems based on dynamic clustering). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2020, No. 1 (39), pp. 135–144.

16. *Doronina Ju.V. and Skatkov A.V.* Osobennosti kvalimetricheskogo analiza polimodel'nyh kompleksov s peremennoj topologiej pri issledovanii slozhnyh tehnicheskih sistem (Features of qualimetric analysis of polymodel complexes with variable topology in the study of complex technical systems). *Vestnik. Tomskogo gos. un-ta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika*, 2021, No. 56, pp. 49–58. DOI: 10.17223/19988605/56/6

УДК 62-523.8 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-101-108

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУР ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ

В.И. Швецова

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33,
E-mail: lerasevas@mail.ru

Предложено методическое решение по структурной оптимизации эргатических систем на основе системного анализа. Используемые методы декомпозиции морфологического и структурного анализа, метод графов, позволяют сформировать предпочтительные синтезированные структуры оптимизируемой эргатической системы по частным технологическим критериям, включая ее техническую и эргономическую части. Показано, что полная практическая оптимизация структуры эргатической системы достигается на стадии критериально-параметрической оптимизации по интегральному критерию в виде целевой функции, включающего в себя и экономические характеристики.

Ключевые слова: эргатическая система контроля, оптимизация, надежность, эффективность.

Поступила в редакцию: 27.05.2022.

Введение. Система, в общем понимании, это множество элементов, находящихся в отношениях и связи друг с другом, которое образует определенную целостность и единство [1]. Практически каждый элемент может рассматриваться как система (подсистема), а совокупность отдельных систем – как совокупность отдельных элементов, и в этом случае элемент представляет собой систему. Каждая система имеет свою структуру. Структура – это сеть связей и отношений элементов. При одних и тех же элементах, но разных связях и отношениях их между собой, система может быть более или менее эффективной. Это и обуславливает необходимость оптимизации структур системы, которая может быть выполнена на стадии структурно-компоновочной оптимизации при проектировании.

Эргатические системы различны по своему назначению и поэтому не имеют единой классификации. В данной работе рассмотрена эргатическая система пожаровзрывозащиты.

Успешность функционирования такой системы определяется совершенством взаимодействия человека и техники. Поэтому комплексное исследование эргатических систем контроля и защиты опасных объектов предполагает их изучение как единого целого, что позволит достичь новых качественных результатов. Под эффективностью понимается свойство системы выполнять заданные функции с требуемым качеством. Эффективность эргатической системы включает в себя три составляющие: технологическую, эргономическую и экономическую.

Технологическая составляющая эффективности обусловлена применением технической частью системы установленных функций контроля и защиты при достижении заданной цели на требуемом уровне, например, для предотвращения возгорания, локализации или тушения пожара. До сих пор оценка этого компонента неясна, так как используются разные индивидуальные показатели: продолжительность тушения, расход огнетушащего вещества, защищаемый объем и так далее. Весьма желательно иметь комплексный показатель для оценки технологической эффективности системы. Одним из таких показателей может стать надежность, выступая в качестве эффективности. Для оценки надежности технической части системы на практике используются вероятностные показатели.

Эргономическая составляющая эффективности характеризует эффективность человека-оператора эргатической системы. Это свойство системы может характеризоваться надежностью человеческого фактора. В качестве комплексного показателя оценки надежности человека-оператора вполне допустима вероятность его безотказности действий в системе.

Экономическая составляющая эффективности связана с затратами на создание и обслуживание технических средств системы, стоимостью защищаемого объекта и предотвращенным ущербом при нормальном функционировании её на объекте. Экономическая эффективность в значительной мере зависит от технологической составляющей и эффективности человека-оператора. Это обстоятельство обуславливает необходимость того, чтобы оценочный критерий эффективности системы в целом был интегральным.

Целью статьи является показать методический подход к оптимизации эргатической системы контроля и защиты взрывопожароопасного объекта.

Для взрывопожароопасного объекта на первой стадии оптимизации структуры эргатической системы сформировано множество её элементов. На второй стадии для определения совокупности элементов связей между ними и функцией оптимальности выполняется декомпозиция системы на элементы на основе её структурно-функциональной схемы. Для формирования множества вариантов структуры системы используется аппарат морфологического анализа. Выбор предпочтительных вариантов выполняется на основе метода синтеза множества по экспертным оценкам.

Схемы декомпозиции могу быть простыми (малоэлементными), например, при декомпозиции системы на подсистемы, модули и более сложными (многоэлементными) при установлении связи между блоками, узлами и деталями в них. Это зависит от исходных требований на разработку и проектирование системы, поставленной цели её функционирования с необходимым уровнем надежности и эффективности.

В данной работе рассматривается структурная декомпозиция системы на элементы в виде подсистем, модулей, блоков с целью определения их надежности и эффективности, а по ним системы в целом.

На рис. 1 представлена декомпозиция системы на подсистемы.

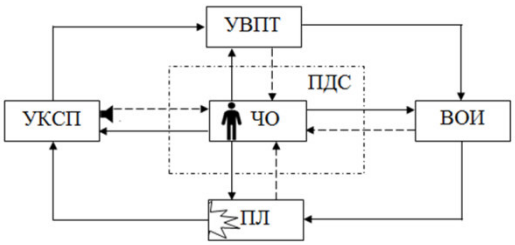


Рис. 1. Схема декомпозиции эргатической системы
Fig. 1. Decomposition scheme of the ergatic system

В схемах декомпозиции технической части (рис. 1) системы принимается последовательное соединение элементов (подсистем, модулей, блоков) исходя из того, что отказ любого из них приводит к отказу всей системы. Такое допущение является обоснованным для эргатических систем контроля и защиты опасных производственных объектов, так как при этом ужесточаются условия оценки надежности, что обусловливает необходимость поиска наиболее «слабого» звена, а, следовательно, повышение его надежности.

Элемент человек-оператор (ЧО) в схемах декомпозиции включен параллельно к техническим элементам, он имеет с ними прямую и обратную связь.

В схемах рис. 1 штрихпунктирной линией выделен процесс действия системы (ПДС), процесс контроля и пуска (ПКИП) установки УКСП (установка контрольно-пожарной сигнализации), процесс действия установки УВПТ (установка взрывопожаротушения). ВОИ – огнетушащие вещества ингибиторного действия.

Для формирования множества структур эргатической системы целесообразно

воспользоваться аппаратом морфологического анализа, который достаточно полно разработан для решения задач технического характера, в частности, проектирования станков, узлов и механизмов [2]. Однако этот метод в чистом виде для решения задач данной работы применять нельзя из-за специфических особенностей эргатических систем, в частности, наложения нормативных ограничений, не отвечающих условиям оптимизации, и не учет реальных, а тем более нормативных, условий функционирования систем при выборе их предпочтительных вариантов.

Поэтому требуется адаптация морфологического анализа к решению задач структурной оптимизации эргатических систем контроля и защиты взрывопожароопасных объектов, как, например, в работе [3].

Структура определения надежности эргатической системы, как обобщенный показатель ее эффективности, включает в себя шесть этапов (рис. 2).



Рис.2. Схема последовательности определения надежности эргатической системы
Fig. 2. Sequence scheme for determining the ergatic system reliability

На первом этапе уточняется в целом характеристика системы, защищаемого объекта и взрывопожароопасной среды. Определяется назначение системы и режимы ее функционирования. Выделяются особенности отдельных элементов системы, их ремонтопригодность и резервирование. Формулируются задачи оценки надежности системы и её структурная композиция с учетом взрывопожароопасных мест объекта.

На втором этапе формулируются понятия отказов и восстановлений элементов системы. Приводятся основные законы распределения показателей надежности и выбираются из них удовлетворяющие проектируемой эргатической системе.

На третьем этапе составляются структурно-функциональные и структурно-логические расчетные схемы надежности вариантов эргатической системы и её элементов. Выбираются единичные и комплексные показатели надежности и расчетные выражения этих показателей.

На четвертом этапе производится выбор номенклатуры и обоснование показателей структурной надежности системы. Выбор выполняется в соответствии со стандартом ГОСТ 27.002-89 [4] по классификационным признакам. Назначение уровня надежности системы в основном зависит от опыта проектировщика (разработчика). При этом используются ГОСТ 27.310-95 [5, таб. В1].

На пятом этапе уточняются выражения комплексных показателей надежности применительно к системам контроля и защиты взрывопожароопасных объектов с учетом режимов работы (функционирования) систем. Из комплексных показателей принимаются коэффициент готовности $K_{\text{г}}$ и коэффициент оперативной готовности $K_{\text{ог}}$, в зависимости от режима контроля и режима исполнения, т.е. действия системы по защите объекта в случае возникновения загорания.

На шестом этапе по комплексным показателям надежности выбираются из предпочтительных рациональные варианты структур системы для дальнейшей оптимизации на критериально-параметрической стадии.

При разработке и проектировании технических объектов, в том числе си-

стем контроля и защиты взрывопожароопасных, принимаются стандартные структурные методы расчета надежности [5]. Они являются «основными» методами расчета показателей безотказности, ремонтопригодности в процессе проектирования объектов, поддающихся разукрупнению на элементы, характеристики надежности которых в момент проведения расчетов известны или могут быть определены другими методами (прогнозирования, физическими, по статистическим данным, собранными в процессе их применения в аналогичных условиях). В соответствии с законодательнонормативными актами все пожаровзрывоопасные объекты оборудуются АУП, эксплуатация которых сопровождается фиксированием в специальных журналах отказов, восстановлений, состояний, временных и других характеристик, что представляет достаточную статистику для оценки надежности как отдельных элементов, та и систем в целом.

В данной работе излагается математический аппарат оценки надежности технической части эргатической системы контроля и защиты взрывопожароопасного объекта на основе известных положений теории надежности.

Принимается, что система восстанавливаемая, нерезервируемая, но отдельные элементы, для повышения надежности, могут быть зарезервированы. Отказы технических элементов системы в основном внезапные и только около 15 % из них постепенные. Постепенные чаще имеют место в подсистеме контроля опасной ситуации (загорания). Поэтому принимается суммарная интенсивность ($\lambda_0 = \lambda_{\text{внз}} + \lambda_{\text{п}}$), как внезапных отказов, которая рассчитывается по средней наработке (времени безотказности) на отказ $\overline{T_0}$. В этом случае $\lambda_0 = 1/\overline{T_0}$.

Допускается также, что после отказа элемента системы сразу начинается восстановление его работоспособности путем профилактики (замены) или ремонта. Среднее время восстановления работоспособности $\overline{\theta_{\text{в}}}$ определяется по статистическим данным, а интенсивность восстановления $\mu_{\text{в}} = 1/\overline{\theta_{\text{в}}}$.

Так как плотности интенсивностей отказов и восстановлений каждого элемента R системы во времени τ стремятся к пределам, то для элемента

$$\lim \lambda_R(\tau) = \frac{1}{\overline{T_R}}, \quad \lim \mu_R(\tau) = \frac{1}{\overline{\theta_R}}, \quad (1)$$

для системы

$$\lambda(\tau) = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\overline{T_{R\,i}}}; \ \ \mu(\tau) = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\overline{\theta_{R\,i}}}. \quad (2)$$

Поскольку интенсивность отказов достаточно мала, то поток их можно принять постоянным, а, следовательно, вероятность появления n отказов в промежутке времени $\Delta\tau$ зависит только от n и $\Delta\tau$ и не зависит от положения $\Delta\tau$ на оси времени. Исходя из теории массового обслуживания [6], предполагая, что функция плотности вероятности безотказности системы $f(\tau)$ непрерывна, то вероятность появления отказов в технических системах на одном интервале времени не влияет на вероятность их появления на другом интервале, не пересекающимся с первым. На этом основании принимается, что в потоке отказов отсутствует последствие и поток отказов считается ординарным, т.е. вероятность одновременного появления двух отказов равна нулю. В этом случае функция $\lambda(\tau)$ постоянна, т.е. $\lambda(\tau) = \lambda = const$. Таким образом, поток отказов в технической системе можно считать простейшим, ординарным, стационарным с отсутствием последействия.

При принятых выше условиях вероятность безотказности работы технической части эргатической системы описывается выражением закона Пуассона

$$P(\tau) = \frac{(\lambda_0\tau)^n}{n!} e^{-\lambda_0\tau}. \quad (3)$$

Поскольку число отказов, появляющихся в заданном интервале времени, имеет пуассоновское распределение, то можно принять, что время между отка-

зами имеет экспоненциальное распределение, которое является частным случаем пуассоновского распределения. В этом случае вероятность безотказности эргатической системы в течение времени τ описывается выражением

$$P(\tau) = e^{-\lambda\tau}. \quad (4)$$

Отмеченный подход оценки вероятности безотказности эргатической системы распространяется и на потоки восстановления работоспособности элементов в целом системы.

Кроме экспоненциального распределения показателей надежности могут быть другие законы распределений, например, нормальный закон Гаусса, применимый при наличии постепенных отказов или универсальный закон Вейбулла. Но экспоненциальное распределение, помимо того, что оно более доступное в практическом применении, дает заниженные оценки надежности по сравнению с другими распределениями. Такое ужесточение, по-видимому, должно стать необходимым требованием к оценке надежности расчетным способом средств безопасности, к которым относятся и эргатические системы взрывопожарозащиты.

Для расчета надежности составляются структурные схемы системы, подсистемы блоков, и при необходимости более мелких элементов, по которым проводится оптимизация структур, а по ним составляются логические расчетные схемы. Соединение элементов в структурных схемах может быть последовательным, параллельным, параллельно-последовательным и сложным. Соединение элементов в расчетных логических схемах также может быть разным и не обязательно повторять соединения структурных схем.

Это зависит от состояния элементов в системе и принятых методов оценки вероятностей этих состояний, условий безопасности защищаемых объектов, опыта проектировщиков и числа рассматриваемых элементов в системе.

Для систем безопасности, в том числе эргатических систем контроля и защиты взрывопожароопасных объектов, целесообразно принимать последовательную логическую расчетную схему (рис. 3), так как при этой схеме получаем нижний уровень надежности, что побуждает при проектировании систем изыскивать дополнительные меры повышения надежности их до приемлемого уровня.

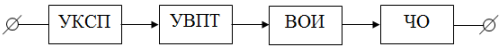


Рис. 3. Декомпозиция логически последовательной расчетной схемы надежности
Fig. 3. Decomposition of a logically consistent design reliability scheme

Для логических расчетных схем с последовательным соединением элементов выражение вероятности безотказности имеет вид

$$P_c = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot \ldots \cdot P_N = \prod_{i=1}^{N} P_i. \quad (5)$$

Расчет надежности технической части восстанавливаемой эргатической системы с использованием метода марковских случайных процессов в чистом виде невозможно. Требуется адаптация их с учетом нормативных требований к системам и режимам их работы, похожая задача была решена в работе [7], но для звена «человек-оператор».

Экономические показатели оптимизации структур эргатической системы пожарной безопасности представлены работами [8, 9].

Анализ состояния исследуемой задачи позволил сформулировать интегральную целевую функцию эргатической системы пожарной безопасности принимающую следующий вид

$$f(P_{\text{тч}}, P_{\text{чо}}, P_{\text{об}}, \Delta\text{У}, K_{\text{з}}, \text{З}_{\text{э}}, T_{\text{н}}) \rightarrow max, \quad (6)$$

где $P_{тч}$ – надежность технической части системы по ее вероятности безотказной работы; $P_{чо}$ – надежность человека-оператора по его вероятности безотказности действий в системе; $P_{об}$ – надежность защищаемого объекта по вероятности отсутствия загорания, определяемой по вероятности (риску α) возникновения загорания, т.е. $P_{об} = 1 - \alpha$; $\Delta У$ – предотвращенный экономический ущерб в результате действия на объекте системы пожарной безопасности, который равен разности возможного ущерба в случае отсутствия системы безопасности $У_в$ и непредотвращенного ущерба $У_н$ при наличии и срабатывании на объекте системы, т.е. $\Delta У = (У_в - У_н)$; $K_з$ – капитальные затраты на создание системы (разработку, проектирование, изготовление, освоение); $З_э$ – годовые приведенные эксплуатационные затраты на обслуживание системы; $T_н$ – нормативный срок службы системы.

Общие затраты на создание и эксплуатацию системы $З_{об} = K_з + З_э \cdot T$. Экономическая эффективность Э в виде относительного показателя $П_{эф}$ определяется по формуле

$$Э = П_{эф} = \Delta У / (K_з + З_э \cdot T_н). \quad (7)$$

С учетом сказанного выше, целевая функция критериально-параметрической оптимизации рациональных структур эргатической системы пожарной безопасности имеет вид

$$I = \frac{P \cdot \Delta У}{K_з + З_э \cdot T_н} \to max, \quad (8)$$

или в более компактной форме

$$I = f(P \cdot Э) \to max, \quad (9)$$

где P – общая надежность эргатической системы пожарной безопасности, равная произведению вероятностей составляющих, как независимых последовательных событий

$$P = P_{тч} \cdot P_{чо} \cdot P_{об} = \sum_{i=1}^{n} P_i. \quad (10)$$

Следуя стандарту ГОСТ 12.1.004-91 (Приложение 4) [10], сумма математических ожиданий экономических потерь от пожара $\sum_{i=1}^{n} M(П_i)$ в руб. национального богатства $M(П_{нб})$, отвлечения ресурсов на компенсацию последствий пожара $M(П_{ор})$, потерь от простоя объекта, обусловленного пожаром $M(П_{по})$, определяется по выражению

$$\sum_{i=1}^{n} M(П_{i)} = \begin{bmatrix} M(П_{нб}) + M(П_{ор}) + \\ + M(П_{по}) \end{bmatrix} \cdot Q_n, \quad (11)$$

где Q_n – вероятность возникновения пожара на объекте, год$^{-1}$.

Вероятность Q_n рассчитывается по [10] или оценивается по статистическим данным, т.е. определяется риск α. В этом случае $Q_n = \alpha$, а выражение (11) следовало бы записать в виде

$$P = P_{тч} \cdot P_{чо} \cdot \alpha. \quad (12)$$

Правомерность практического применения выражения (10) или (12) лежит в сфере научной дискуссии. Критериальная, двухпараметрическая функция (9), т.е. функция двух фундаментальных, взаимосвязанных аргументов с ограничениями P и Э, определяет решающее состояние безопасности взрывопожароопасного объекта, оснащенного эргатической системой защиты. Оптимизация этой функции не имеет однозначности. Возможны несколько методов ее оптимизации.

Заключение. Теоретические основы последовательной оптимизации структур эргатических систем контроля и защиты взрывопожароопасных объектов, построенные на системном анализе синтеза больших технических систем, открывают понимание возможности используемых расчетных способов и инженерных приемов в проектировании, в том числе

и при ограниченности статистических данных, компенсируемых методами экспертных оценок.

Предложенный метод декомпозиции морфологического и структурного анализа позволяет выделить из множества рациональные варианты по комплексному критерию – надежности, являющейся частным случаем эффективности эргатической системы. В отсутствие статистических данных по интенсивностям отказов и восстановлений работоспособности отдельных элементов системы, предложенная методология единичной наиболее ответственной технологической операции и выходного действия человека, позволяет выполнить оценки надежности и выделить рациональные варианты структур.

Предложенный критерий в виде целевой функции критериально-параметрической оптимизации, ранее выделенных рациональных из числа предпочтительных вариантов структур эргатической системы, с ограничениями основополагающих, взаимозависимых ее аргументов в виде финальных надежности и эффективности, позволяет расчетным способом выделить оптимальный вариант структуры системы пожарной безопасности, преодолевая затруднения практической оптимизации, приняв альтернативу экстремуму функции наибольшее значение ее функционала в области ограничения аргументов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Холл А.Д., Фейджин Р.В.* Определение понятия системы // Сборник. Исследование по общей теории систем. М.: Прогресс, 1969. С. 252–286.

2. *Кузнецов Ю.Н.* Методическое указание по применению системно-морфологического поиска новых технических решений. К.: КПИ, 1985. 60 с.

3. *Швецова В.И., Одинцов А.Н.* Методология морфологического анализа характеристик человека-оператора в эргатических системах безопасности // Вісник Сев НТУ. Сер. Оптимизация виробничих процесів: Зб. наук. пр. Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. Вип. 15. 2014. С. 218–223.

4. *ГОСТ 27.002-2015.* Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016.

5. *ГОСТ 27.310–95.* Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичность отказов: введен 1997-01-01. Минск: ИПК, Изд-во стандартов. Приложения А, В.

6. *Овчаров Л.А.* Прикладные задачи теории массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1989. 257 с.

7. *Швецова В.И., Севриков В.В.* Математическое моделирование надежности человека-оператора в эргатических системах контроля объектов повышенной опасности // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. Севастополь, 2014. Вып. 20. С. 202–208.

8. *Севриков И.В.* Экономическая составляющая целевой функции оптимизации структур эргатических систем // Вестник СевНТУ. Вып. 97: Механіка, енергетика, екологія: Зб. наук. пр. Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2009. С. 150–153.

9. *Севриков И.В., Квасова Л.В., Паньков Е.К.* Определение предотвращенного ущерба от загрязнения воздуха при наличии информационно-эргатических систем контроля и защиты объектов // Вісник Сев ДТУ. Вып. 97: Механіка, енергетика, екологія: Зб. наук. пр. Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2009. С. 169–172.

10. *ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ.* Пожарная безопасность. Общие требования. Взамен ГОСТ 12.1.004-85.: М.: Стандартинформ, 2006.

THEORETICAL FOUNDATIONS FOR OPTIMIZING THE STRUCTURES OF ERGATIC CONTROL SYSTEMS

V.I. Shvetsova

Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

A methodological solution for the structural optimization of ergatic systems based on system analysis is proposed. The used methods of decomposition of morphological and structural analysis, the method of graphs, make it possible to form the preferred synthesized structures of an optimized ergatic system according to particular technological criteria, including its technical and ergonomic parts. The complete practical optimization structure of the ergatic system achieved at the stage of criterion-parametric optimization by an integral criterion in the form of an objective function, which also includes economic characteristics, is shown.

Keywords: ergatic control system, optimization, reliability, efficiency.

REFERENCES

1. *Holl A.D. and Fejdzhin R.V.* Opredelenie ponyatiya sistemy (Definition of the concept of a system). *Issledovanie po obshchej teorii sistem.* Moscow: Progress, 1969, pp. 252–286.

2. *Kuznecov YU.N.* Metodicheskoe ukazanie po primeneniyu sistemno-morfologicheskogo poiska novyh tekhnicheskih reshenij (Guidelines for the use of system-morphological search for new technical solutions). Kiev: KPI, 1985, 60 p.

3. *Shvecova V.I. and Odincov A.N.* Metodologiya morfologicheskogo analiza harakteristik cheloveka-operatora v ergaticheskih sistemah bezopasnosti (Methodology for the morphological analysis of the characteristics of a human operator in ergatic security systems). *Visnik SevNTU: Optimizaciya virobnichih procesiv,* 2014. No. 15, pp. 218–223.

4. *GOST 27.002-2015.* Moscow: Standartinform, 2016.

5. *GOST 27.310–95.* Minsk: IPK, Izd-vo standartov. Prilozheniya A, B.

6. *Ovcharov L.A.* Prikladnye zadachi teorii massovogo obsluzhivaniya (Applied Problems of Queuing Theory). Moscow: *Mashinostroenie,* 1989, 257 p.

7. *Shvecova V.I. and Sevrikov V.V.* Matematicheskoe modelirovanie nadezhnosti cheloveka-operatora v ergaticheskih sistemah kontrolya ob"ektov povyshennoj opasnosti (Mathematical modeling of the reliability of a human operator in ergatic control systems for objects of increased danger). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy,* 2014, No. 20, pp. 202–208.

8. *Sevrikov I.V.* E`konomicheskaya sostavlyayushhaya celevoj funkcii optimizacii struktur e`rgaticheskix system (The economic component of the objective function of optimizing the structures of ergatic systems). *Vestnik SevNTU*: *Mexanika, energetika, ekologiya*, 2009, No. 97, pp. 150–153.

9. *Sevrikov I.V., Kvasova L.V., and Pan`kov E.K.* Opredelenie predotvrashhennogo ushherba ot zagryazneniya vozduxa pri nalichii informacionno-e`rgaticheskix sistem kontrolya i zashhity` ob``ektov (Determining the prevented damage from air pollution in the presence of information-ergatic systems for monitoring and protecting objects). *Visnik SevNTU*: *Mexanika, energetika, ekologiya,* 2009, No. 97, pp. 169–172.

10. *GOST 12.1.004-91.* SSBT. (USSR standard), Moscow: Standartinform, 2006.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Агаркова-Лях И.В. 22, 73

Аминова Э.К. 31

Асфандиярова Л.Р. 31

Бычек Д.С. 31

Воскресенская Е.Н. 5

Вышкваркова Е.В. 5

Гайский В.А. 36

Гребнева Е.А. 12

Доронина Ю.В. 92

Исламутдинова А.А. 31

Истомин В.И. 46

Касьянова Л.З. 31

Клименко А.Г. 46, 61

Лях А.М. 22, 73

Моисеев Д.В. 92

Назирова С.С. 31

Очеретяный В.А. 61

Полонский А.Б. 12

Скатков А.В. 92

Сухонос О.Ю. 5

Тверская С.Е. 46

Фролова К.В. 73

Хлебникова В.В. 46

Шагидуллин А.Р. 84

Швецова В.И. 101

Шоларь С.А. 51

Щодро А.Е. 51

Системы контроля окружающей среды
Выпуск 2 (48)

Monitoring systems of environment
Issue 2 (48)

Адрес редакции:
Институт природно-технических систем (ИПТС)
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: skos.sevastopol@inbox.ru
Тел.: +7 (8692) 54-44-10
http://www.msoe.ru

Технические редакторы: И.Г. Шмырева, С.В. Малахатко

Подписано к печати 23.06.2022
Выход в свет 29.06.2022
Заказ 32. Тираж 100 экз.
Распространяется бесплатно

Отпечатано ИК ИПТС
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
ОГРН 1022302946489 от 24.05.2012
Тел.**: +7** (8692) 54-44-10
ph@instpts.ru