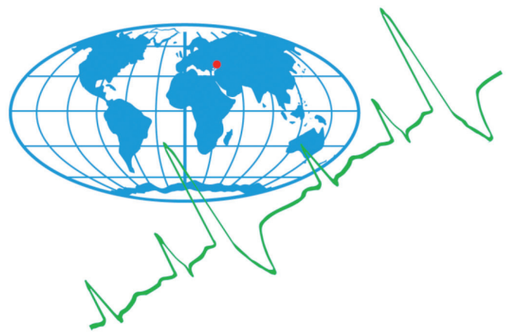
ISSN 2220-5861

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ИНСТИТУТ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 3 (49)



Севастополь

2022

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ № 3 (49) 2022

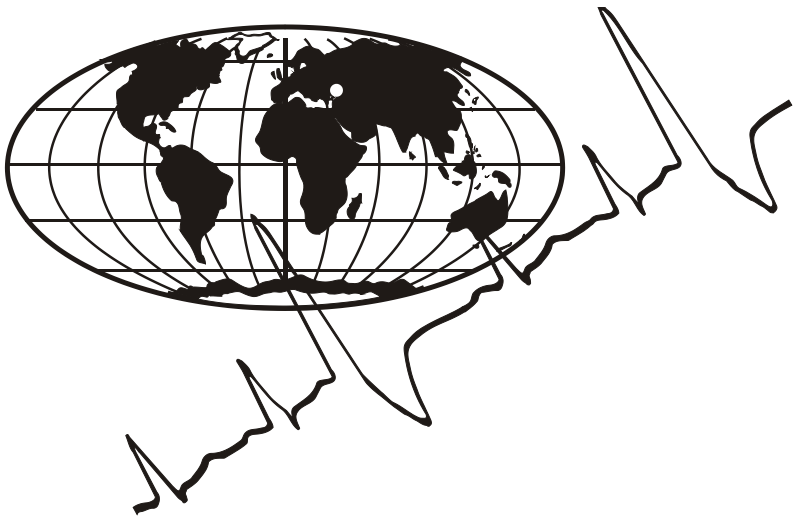
ISSN 2220-5861

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ИНСТИТУТ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 3 (49)



Севастополь

2022

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 3 (49) 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 и средств контроля и диагностики природной среды и климата

А.А. Валле. Особенности междесятилетней изменчивости кислородного режима в весенний сезон в Черном море 5

А.Б. Федотов. Анализ формирования струйного зонального течения как элемента океанической циркуляции при различной локализации ветрового воздействия 12

И.В. Агаркова-Лях, А.М. Лях. Особенности структуры ландшафтов морских берегов 18

И.И. Казанкова. Особенности распределения и размерный состав постличинок мидии *Mytilus galloprovincialis* на контрольных субстратах в прибрежных водах южного и юго-западного Крыма. 27

Технические средства систем контроля окружающей среды

М.Н. Пеньков, С.А. Шоларь, О.А. Степанова. Лабораторная установка для изучения влияния переменного электромагнитного поля на морскую микробиоту 37

Системы экологического мониторинга

А.А. Егоркин. Методологические подходы к оценке возможного негативного воздействия на экологическую обстановку источников загрязнений из Европы 44

Г.А. Сигора, Л.А. Ничкова, Т.Ю. Хоменко. Анализ и прогноз чрезвычайных техногенных ситуаций в Севастопольском регионе. 51

А.Г. Клименко, А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеенко. Анализ схемных решений когенерационных установок на базе двигателей внутреннего сгорания и их влияние на эффективные и экологические характеристики 62

А.Е. Щодро, А.Н. Сорокин. Контроль баланса наносов на участке морского побережья и влияние работы сквозных берегозащитных сооружений на берег 69

Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение в системах контроля природной среды

Н.А. Жильникова, А.А. Баранова, В.О. Смирнова, И.А. Шишкин. Моделирование нормирования техногенной нагрузки от предприятий-водопользователей в территориальных природно-производственных комплексах 79

А.В. Скатков, А.А. Брюховецкий. Коллаборационные стратегии обнаружения уязвимостей интерфейсов информационно-измерительных сетей ПТС при технологиях 5G 84

А.М. Лях, С.Г. Лелеков. База данных очертаний створок диатомовых микроводорослей 97

Аппаратная, информационная и метрологическая надежность систем контроля природной среды

А.Н. Греков, Н.А. Греков, С.С. Пелюшенко. Повышение точности измерения скорости звука в векторном однолучевом акустическом измерителе скорости течения 106

В.А. Нурзай, Ю.М. Быковский. Исследование влияния освещённости на погрешность измерения вибраций технологических объектов фотомодуляционным голографическим способом 117

Алфавитный указатель авторов. 127

УДК 551.465 (262.5) DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-5-11

ОСОБЕННОСТИ МЕЖДЕСЯТИЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА В ВЕСЕННИЙ СЕЗОН В ЧЕРНОМ МОРЕ

А.А. Валле

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: *ogorodovaa.a@mail.ru*

По архивным данным наблюдений, выполненных с 1923 по 2022 гг., проанализирована междесятилетняя изменчивость растворенного кислорода. Анализ был сделан для весеннего сезона в глубоководной и северо-западной частях Черного моря. Уточнены статистически значимые особенности формирования кислородного режима. Показано, что в весенний период присутствует изменчивость растворенного кислорода на многолетнем масштабе в глубоководной и северо-западной частях Черного моря.

Ключевые слова: кислородный режим, северо-западная часть Черного моря, глубоководная часть

Поступила в редакцию: 20.07.2022. После доработки: 30.08.2022.

Введение. Кислородный режим Черного моря является важным индикатором общего состояния экосистемы моря. Представление о его временной и пространственной изменчивости необходимо для понимания процессов, управляющих его динамикой. Черное море представляет собой превосходную лабораторию для изучения фундаментальных процессов, связанных с долгосрочными изменениями биогеохимии на Земле. Черное море – это крупнейший в мире замкнутый внутренний бассейн, соединенный со Средиземным морем через мелководные проливы Босфор и Дарданеллы. Пролив Босфор представляет собой узкий, протяженный и мелководный канал длиной примерно 31 км, который участвует в формировании гидрологического режима Черного моря. Так же в формировании термохалийной структуры вод Черного моря участвует речной сток на северо-западном шельфе, который приводит к более низким значениям солености поверхностных вод (около S = 18‰) по сравнению с более солеными средиземноморскими водами (около S = 36–38‰) [1].

За последние несколько десятилетий экологическое состояние Черного моря серьезно ухудшилось из-за климатических изменений и землепользования, включая зарегулирование и безвозвратное изъятие стока части рек, впадающих в Черное море [2–4]. Соответственно возникают гипоксические и аноксические зоны [5, 6], что еще больше ухудшает морскую экосистему Черного моря. Чтобы оценить многолетние изменения кислородного режима необходимо хорошо понимать краткосрочные колебания [7, 8]. Поэтому необходимо глубокое знание и особое внимание к временной и пространственной изменчивости растворенного кислорода. В настоящей статье представлены наблюдения, проведенные в Черном море с помощью судовых данных и профилирующих буев Арго, оснащенных кислородными датчиками. Научные цели настоящего исследования заключались в следующем:

1) Пересмотреть и обновить интерпретации исторических наблюдений по кислороду с 1923 по 2022 гг. в глубоководной и северо-западной частях Черного моря в весенний период;

2) Провести анализ и выявить причины распределения растворенного кислорода в весенний период в слое 0–40 м на междесятилетнем масштабе в глубоководной и северо-западной частях Черного моря.

Методы измерения кислорода. Данные наблюдений, контроль качества данных и метод обработки. До 1988 г. все измерения кислорода в Черном море проводились по методу Винклера, благодаря которому был установлен слой сосуществования кислорода и сероводорода (С-слой). В ходе американо-турецкой экспедиции на НИС «Кнорр» в 1988 г. было обнаружено, что концентрации кислорода в С-слое, измеренные методом Винклера, значительно завышены. Авторы [7, 9] описали возможные причины завышенных концентраций кислорода. Одна из причин – загрязнение проб атмосферным кислородом при пробоотборе из-за нарушения герметичности батометров. Безбородов и Еремеев [9] показали, что такие ошибки могут составлять 5–15 μM и существенно варьироваться в экспедиционных условиях. Благодаря экспедиции «Knorr» было доказано отсутствие С-слоя.

На ряду с судовыми измерениями растворенного кислорода появились современные измерения при помощи автономных буев-профилографов Argo, оснащенных датчиками кислорода. Первые буи Argo, которые измеряли не только температуру, соленость, но и концентрацию кислорода по вертикальным профилям через равные промежутки времени в 5 дней были запущенны с 7 апреля 2010 г. по 29 июля 2010 г. в северной части Черного моря. На сегодняшний день буи Argo дрейфуют по всей глубоководной части Черного моря. [8]. До сих пор нет точного и высокочувствительного способа измерения низких концентраций растворенного кислорода [10].

Для анализа междесятилетней изменчивости растворенного кислорода в глубоководной и северо-западной частях Черного моря использованы данные из банка данных Института природно-технических систем (ИПТС) с 1923 по 2022 гг. Использован относительно большой объем данных наблюдений, полученных в апреле–июне в верхнем слое, а именно на горизонтах 0, 10, 20, 40 и 50 м отдельно в северо-западной части и в глубоководной части Черного моря (рис. 1, табл. 1).

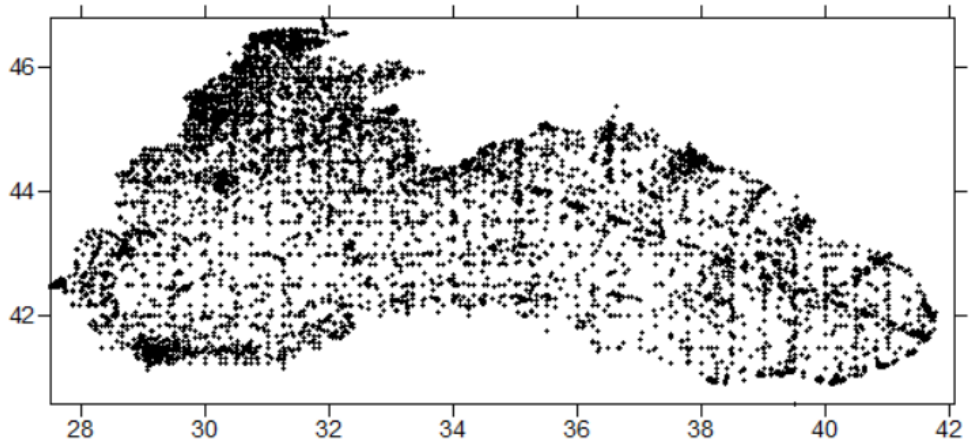


Рис. 1. Пространственное распределение станций по кислороду на поверхности, выполненных в апреле – июне с 1923 по 2022 гг.
Fig. 1. Spatial distribution of stations by oxygen on the surface, performed in April–June from 1923 to 2022

Таблица 1. Обеспеченность количеством данных в северо-западной и глубоководной частях Черного моря с 1923 по 2022 гг. с апреля по июнь. Приведено количество наблюдений из базы данных ИПТС

Горизонт	СЗЧМ	Глубоководная часть
0	6 498	8 249
10	5 769	7 895
20	4 834	7 311
40	–	6 186
50	–	7 438

Пространственно-временная структура массива крайне нерегулярна. С глубиной количество данных уменьшается. Поэтому для каждого месяца и горизонта было проведено восстановление данных в узлах регулярной сетки посредством метода оптимальной интерполяции. Междесятилетняя изменчивость анализировалась по данным, рассчитанным по восстановленным в узлах регулярной сетки значениям на каждом горизонте.

В качестве границы северо-западного шельфа Черного моря (СЗЧМ) выбраны береговая черта от м. Калиакра до м. Сарыч (43º23' с.ш., 34º в.д.) и изобата 100 м. Глубоководная часть ограничена изобатой 1000 м.

Результаты и их обсуждение. Ранее нами был проведен анализ долгопериодной изменчивости кислорода и температуры в глубоководной и северо-западной частях Черного моря в зимний и летний сезоны. Анализ показал, что на междесятилетнем масштабе и в зимний, и в летний сезон, концентрация растворенного кислорода характеризуется выраженной квазипериодической изменчивостью с типичным временным масштабом в несколько десятков лет и амплитудой примерно вдвое меньшей амплитуды внутригодового хода. В зимний период эта изменчивость в основном связана с региональными изменениями температуры морской воды. Летом (особенно, на северо-западном шельфе) важны и другие факторы (вариации стока рек, температура речных вод, фотосинтез и др.). Вследствие этого в 1990-е и начале 2000-х гг. в летний период температура поверхностного слоя вод северо-западного шельфа превысила температуру поверхности в открытой части моря и одновременно уменьшилась концентрация растворенного кислорода [11].

В междесятилетней изменчивости растворенного кислорода в весенний сезон в глубоководной и северо-западной частях Черного моря наблюдается изменчивость на многолетнем масштабе (рис. 2, 3).

Глубоководная часть. В весенний период с 1923 по 1989 гг. содержание растворенного кислорода на горизонтах 0, 10 и 20 увеличивалось на 48, 38 и 31 μM соответственно (рис. 2 а). С 1989 по 2009 гг. происходило резкое понижение среднедекадного содержания растворенного кислорода на горизонтах 0, 10 и 20 м (более чем на 90 μM). Такое резкое понижение содержания кислорода предположительно связано с эвтрофикацией в глубоководной части моря в конце 1980-х – начале 1900-х годов. Авторы [12] показали, что интенсификация поступления азота и фосфора во второй половине XX в., при которой биогенные элементы оказались постоянно в избытке, привело к ряду последствий, в том числе и уменьшению концентрации кислорода. За счет увеличения биомассы фитопланктона и последующему его отмиранию кислород расходуется на окисление оседающего взвешенного органического вещества фитопланктонного происхождения.

С 2009 г. по настоящее время происходит рост содержания кислорода на горизонтах 0, 10 и 20 м примерно на 60 μM (рис. 2 а). На горизонте 40 м на протяжении 60 лет наблюдается значимый отрицательный тренд, и содержание кислорода уменьшилось примерно на 60 μM и на 50 м так же наблюдается значимый отрицательный тренд и падение содержания кислорода на протяжении примерно 100 лет более чем на 80 μM (рис. 2 б, в).

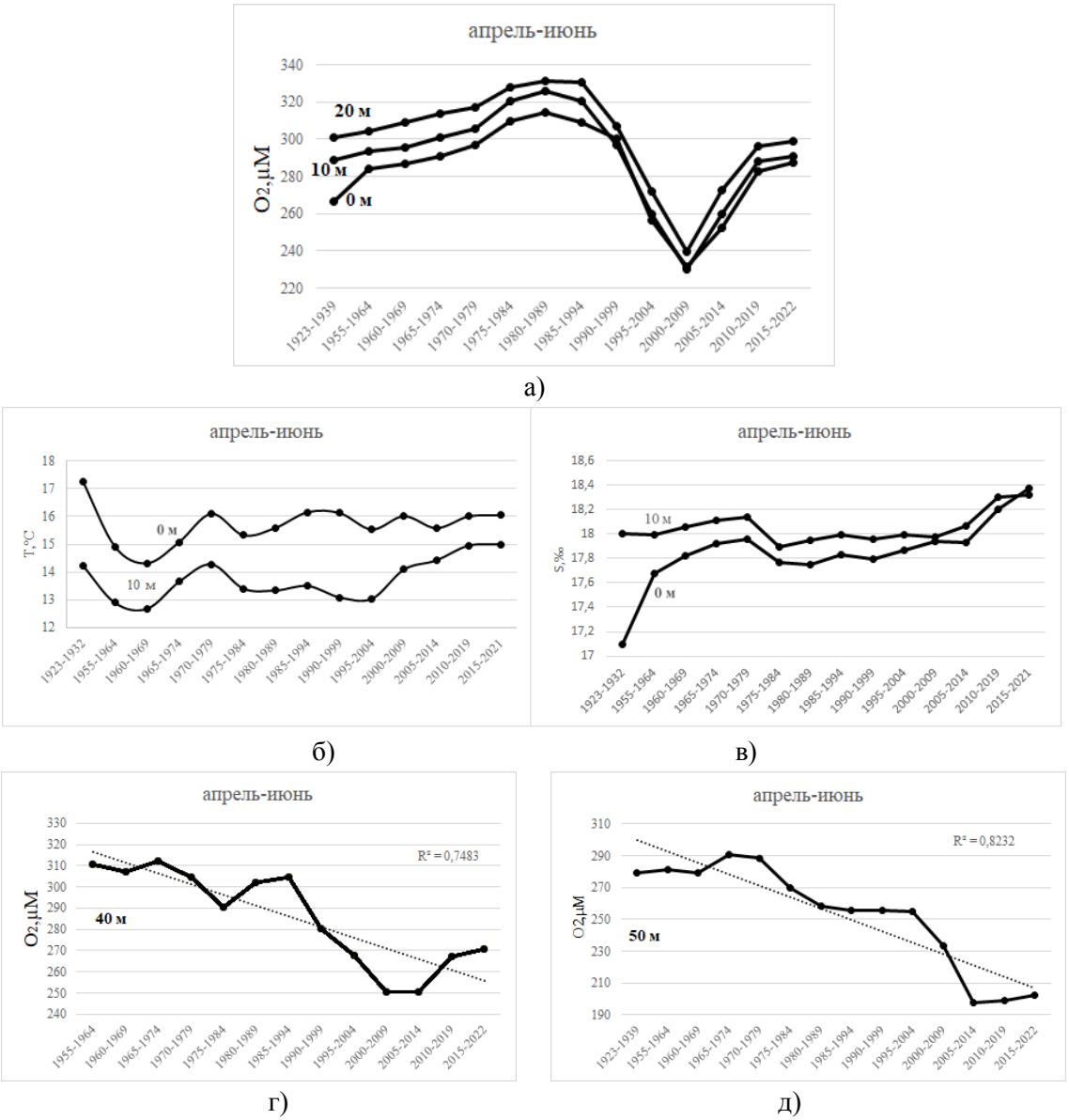


Рис. 2. Междесятилетняя изменчивость кислорода (а) в глубоководной части Черного моря за период с 1923 по 2022 гг. на горизонтах 0–20 м (а), 40 м (г) и 50 м (д), температуры (б) и солености (в)

Fig. 2. Interdecadal variability of oxygen in the deep part of the Black Sea for the period from 1923 to 2022 at the horizons of 0–20 m (a), 40 m (d) and 50 m (e) ,temperature (b) and salinity (c)

Северо-западная часть. С апреля по июнь в междесятилетней изменчивости растворенного кислорода на горизонтах 0, 10 и 20 м в северо-западной части Черного моря наблюдается изменчивость, близкая по фазе к изменчивости в глубоководной части моря (рис. 3). В период с 1923 по 1989 гг. происходит увеличение растворенного кислорода (примерно на 52 μM), а затем с 1989 по 2004 гг. происходит понижение растворенного кислорода (примерно на 36 μM). С 2004 по 2009 гг. происходит рост концентрации кислорода на горизонте 0 м (концентрация кислорода выросла на 37 μM), 10 м (более чем на 29 μM) и на 20 м (около 13 μM).

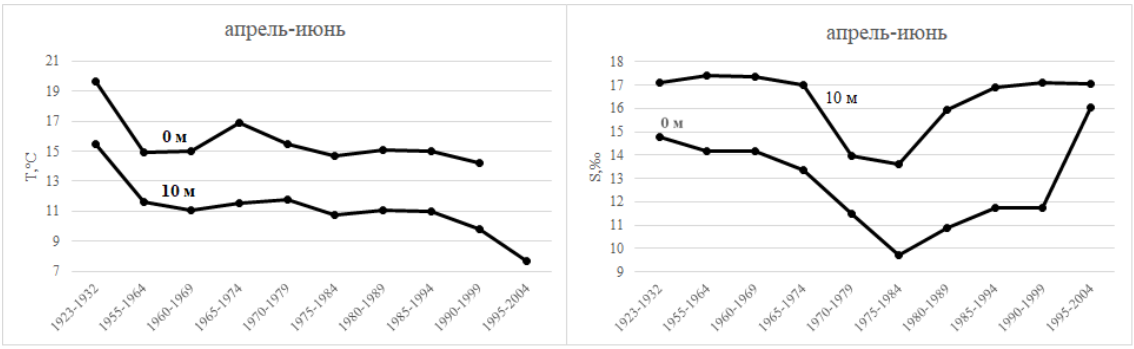
Отметим, что весной междесятилетняя изменчивость концентрации растворенного кислорода не согласуется с изменчивостью температуры и солености (рис. 2 б, в; рис. 3 б, в) как в зимний период. Это справедливо как для открытой части Черного моря, так и для северо-

западного шельфа [11]. Весной это в основном связано с тем обстоятельством, что в весенний период происходит интенсивное развитие фитопланктона, сильно влияющего на кислородный режим верхнего слоя моря. Однако для северо-западной части Черного моря помимо фитопланктона на изменчивость поля кислорода влияют вариации стока рек и ветровой режим [13]. Нами в работе [13] был проведен анализ подповерхностных вод СЗЧМ и показано, что весной, в результате увеличения речного стока, происходит повышение устойчивости стратификации вод, что препятствует распространению тепла вглубь и вертикальному обмену кислородом. Наиболее сильное распреснение отмечается на горизонте 10 м. В весенний период южные ветры «запирают» речные воды в более мелководной части шельфа, а западные ветры способствуют распространению распресненных вод к востоку.

Существенную роль в обогащении воды кислородом играет фотосинтетическая деятельность водных растений. Весной, с ростом температуры уменьшается интенсивность турбулентного перемешивания деятельного слоя, а фотосинтетическая аэрация становится главным источником поступления кислорода в толщу воды [14, 15]. Это хорошо прослеживается на междесятилетнем масштабе (рис. 2 и 3), с глубиной концентрация кислорода в глубоководной части в весенний период растет благодаря фотосинтетическому обогащению вод кислородом, а в северо-западной части самые высокие концентрации кислорода содержатся на поверхности (рис. 3).



а)



б) в)

Рис. 3. Междесятилетняя изменчивость кислорода (а) в СЗЧМ за период с 1923 по 2009 гг. на горизонтах 0, 10 и 20 м, температуры (б) и солености (в)

Fig. 3. Interdecadal variability of oxygen (a) in the northwestern part of the Black Sea for the period from 1923 to 2009 at 0, 10 and 20 m horizons, temperature (b) and salinity (c)

Выводы. Таким образом, в многолетнем распределении кислорода в весенний период наблюдается изменчивость на многолетнем масштабе. Показано, что с 1989 по 2009 гг. происходило резкое понижение среднедекадного содержания растворенного кислорода на горизонтах 0, 10 и 20 м (более чем на 90 μM). Такое резкое понижение содержания кислорода предположительно связано с эвтрофикацией в глубоководной части моря в конце 1980-х – начале 1900-х годов.

На горизонтах 40 и 50 м в глубоководной части на протяжении более 60 лет наблюдается значимый отрицательный тренд, и содержание кислорода за этот период уменьшилось более чем на 60 μM.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИПТС № госрегистрации 121122300074-7.

Автор выражает глубокую благодарность рецензенту за доброжелательную критику рукописи и ценные рекомендации, учет которых позволил улучшить качество рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРТУРЫ

1. *Богданова А.К.* Водообмен через Босфор и его роль в перемешивании вод Черного моря. Киев: Наукова думка, 1969. 245 с.

2. *Полонский А.Б.* Изменения климата: мифы и реальность. Севастополь: ИПТС, 2020. 233 с.

3. *Humborg C.V., Ittekkot A., Bodungen B.* Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure // Nature. 1997. № 386. P. 385–388.

4. *Grgoire M.C., Raick K., Soetaert K.* Numerical modeling of the central Black Sea ecosystem functioning during the eutrophication phase // Prog. Oceanogr. 2008. № 76. P. 286–333.

5. *Konovalov S.K., Murray J.W.* Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960–1995) // J. Mar. Syst. 2001. № 31. P. 217–243.

6. *Oguz T.J., Dippner W., Kaymaz Z.* Climatic regulation of the Black Sea hydrometeorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // J. Mar. Syst. 2006. № 60. P. 235–254.

7. *Murray J.W., Jannash H.W., Honjo S.*Unexpected changes in the oxic/anoxic interface in the Black Sea // Nature. 1989.Vol. 338. P. 411–413.

8. *Валле А.А.* О мониторинге гидролого-гидрохимического режима вод Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 4(46). С. 5–13. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-5-13

9. *Безбородов А.А., Еремеев В.Н.* Черное море. Зона взаимодействия аэробных и анаэробных вод. Севастополь: МГИ АНУ, 1993. 299 с.

10. *Стунжас П.А., Мошаров В.Е., Радченко В.Н.* Возможности фотолюминесцентного метода измерения концентрации кислорода в редокс зоне Черного моря в сравнении с другими методами // Океанология. 2013. Т. 53. № 4. С. 558–558.

11. *Полонский А.Б., Котолупова А.А.* Долгопериодная изменчивость растворенного кислорода и температуры верхнего слоя вод Черного моря // Океанология. 2019. Т. 59. № 1. С. 22–32.

12. *Юнев О.А., Коновалов С.К., Великова В.* Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долговременные тренды, механизмы, последствия / Ин-т биологии юж. морей им. А.О. Ковалевского РАН; Морской гидрофиз. ин-т РАН. М.: ГЕОС, 2019. 164 с.

13. *Валле А.А., Полонский А.Б.* Особенности сезонной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик подповерностных вод северо-западной части Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 2(44). С. 7–15.

14. *Юнев О.А.* Эвтрофикация и годовая первичная продукция фитопланктона глубоководной части Черного моря // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 658–668.

15. *Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М.* Вертикальное распределение фотосинтетических характеристик фитопланктона в Черном море // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 221–237.

FEATURES OF INTERDECADEMY VARIABILITY OF THE OXYGEN REGIME IN THE SPRING SEASON IN THE BLACK SEA

A.A. Valle

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

Based on archival observational data from 1923 to 2022, the interdecadal variability of dissolved oxygen is analyzed. The analysis is made for the spring season in the deep and northwestern parts of the Black Sea. Statistically significant features of the formation of the oxygen regime are specified. It is shown that in the spring period there is a variability of dissolved oxygen on a long-term scale in the deep-water and northwestern parts of the Black Sea.

Keywords: oxygen regime, northwestern part of the Black Sea, deep water part

REFERENCES

1. *Bogdanova A.K.* Vodoobmen cherez Bosfor i ego rol' v peremeshivanii vod CHernogo moray (Water exchange through the Bosphorus and its role in mixing the waters of the Black Sea.). Kiev: Naukova dumka, 1969, 245 p.

2. *Polonskiy A.B.* Izmeneniya klimata: mify i real'nost' (Climate change: myths and reality). Sevastopol': IPTS, 2020, 233 p.

3. *Humborg C.V., Ittekkot A., and Bodungen B.* Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, 1997, No. 386, pp. 385–388.

4. *Grgoire M.C., Raick K., and Soetaert K.* Numerical modeling of the central Black Sea ecosystem functioning during the eutrophication phase. *Prog. Oceanogr.*, 2008, No. 76, pp. 286–333.

5. *Konovalov S.K. and Murray J.W.* Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960–1995). *J. Mar. Syst*., 2001, No. 31, pp. 217–243.

6. *Oguz T.J., Dippner W., and Kaymaz Z.* Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales. *J. Mar. Syst*., 2006, No. 60, pp. 235–254.

7. *Murray J.W., Jannash H.W., and Honjo S.* Unexpected changes in the oxic/anoxic interface in the Black Sea. *Nature*, 1989, No. 338, pp. 411–413.

8. *Valle A.A.* O monitoringe gidrologo-gidrokhimicheskogo rezhima vod Chernogo morya (About monitoring of the hydrological and hydrochemical regime of the Black Sea waters). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2021, No. 4(46), pp. 5–13. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-4-5-13

9. *Bezborodov A.A. and Eremeev V.N.* Chernoe more. Zona vzaimodejstviya aerobnyh i anaerobnyh vod (Black Sea. Zone of interaction between aerobic and anaerobic waters). Sevastopol': MGI ANU, 1993, 299 p.

10. *Stunzhas P.A., Mosharov V.E., and Radchenko V.N.* Vozmozhnosti fotolyuminescentno-go metoda izmereniya koncentracii kisloroda v redoks zone Chernogo morya v sravnenii s drugimi metodami (Possibilities of the photoluminescent method for measuring oxygen concentration in the redox zone of the Black Sea in comparison with other methods). *Okeanologiya*, 2013, Vol. 53, No. 4, pp. 558–558.

11. *Polonskiy A.B. and Kotolupova A.A.* Dolgoperiodnaya izmenchivost' rastvorennogo kisloroda i temperatury verkhnego sloya vod Chernogo morya (Long-term variability of dissolved oxygen and temperature of the upper layer of the Black Sea waters). *Okeanologiya*, 2019, Vol. 59, No. 1, pp. 22–32.

12. *Yunev O.A., Konovalov S.K., and Velikova V.* Antropogennaya evtrofikaciya v pelagicheskoj zone Chernogo morya: dolgovremennye trendy, mekhanizmy, posledstviya (Anthropogenic eutrophication in the pelagic zone of the Black Sea: long-term trends, mechanisms, consequences). Moscow: GEOS, 2019, 164 p.

13. *Valle A.A. and Polonskiy A.B.* Osobennosti sezonnoy izmenchivosti gidrologo-gidrokhimicheskikh kharakteristik podpovernostnykh vod severo-zapadnoy chasti Chernogo moray (Peculiarities of seasonal variability of hydrological and hydrochemical characteristics of subsurface waters in the northwestern part of the Black Sea). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2021, No. 2(44), pp. 7–15.

14. *Yunev O.A.* Evtrofikatsiya i godovaya pervichnaya produktsiya fitoplanktona glubokovodnoy chasti Chernogo morya (Eutrophication and annual primary production of phytoplankton in the deep part of the Black Sea). *Okeanologiya*, 2011, Vol. 51, No. 4, pp. 658–668.

15. *Finenko Z.Z., Churilova T.Ya., and Sosik Kh.M.* Vertikal'noe raspredele-nie fotosinteticheskikh kharakteristik fitoplanktona v Chernom more (Vertical distribution of photosynthetic characteristics of phytoplankton in the Black Sea). *Okeanologiya*, 2004, Vol. 44, No. 2, pp. 221–237.

УДК 551.465.553 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-12-17

АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУЙНОГО ЗОНАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ КАК ЭЛЕМЕНТА ОКЕАНИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А.Б. Федотов

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: fedotov57@mail.ru

В рамках численной модели двухслойного океана с глубиной слоев, соответствующей средним океаническим условиям, проведено исследование эволюции крупномасштабной циркуляции под действием стационарного неоднородного в меридиональном направлении внешнего потока завихренности, моделирующего воздействие ветра на океан, при различной локализации ветровой нагрузки. Эксперименты выполнялись для одного и того же начального поля завихренности, сформированного с помощью численной модели с использованием явной схемы интегрирования по времени при постоянных параметрах диссипации, были выбраны три основных локализации ветровой нагрузки: у западного берега, в центральной части расчетной области и у восточного берега. Во всех трех экспериментах пространственная структура внешнего потока завихренности была идентичной. В работе проанализированы особенности формирования струйного течения у западного берега в зависимости от локализации ветровой нагрузки.
Ключевые слова: синоптическая изменчивость, струйные течения, ветровые течения.

Поступила в редакцию 20.07.2022. После доработки: 15.08.2022.

Введение. Использование относительно простых численных моделей океанической циркуляции позволяет описывать основные физические особенности системы течений, выявлять общие закономерности, оценивать временные и пространственные характеристики исследуемого явления. В предыдущих работах по исследованию долгопериодных осцилляций океанической циркуляции в Северной Атлантике под действием ветра основное внимание было уделено амплитудным характеристикам структуры ветровой нагрузки и средним по расчетной области параметрам стратификации океана [1, 2]. При этом структура ветровой нагрузки была выбрана таким образом, что интенсивность ветрового воздействия на процессы в океане убывала до нуля при приближении к границе расчетной области, то есть эксперименты проводились в условия равенства пространственных масштабов физических процессов в океане и в атмосфере, однако в общем случае это не так. В данной работе сделана попытка исследовать процесс формирования струйного течения вблизи западного берега океана для случая ветровой нагрузки изменяющейся только в меридиональном направлении и воздействующей на структуру океанической циркуляции в западной, центральной и восточной частях расчетной области.

Уравнения и описание модели. В расчетах использована модель эволюции потенциального вихря в двухслойной жидкости для случая глубин верхнего слоя 100 м, нижнего – 3870 м

$$\frac{\partial \omega_j}{\partial t} + J\left(\psi_j, \omega_j\right) + \beta \frac{\partial \psi_j}{\partial x} =$$

$$= -\lambda_j \cdot \omega_j \cdot \delta_{j2} + W_j \cdot \delta_{j1} + D_j, \quad (1)$$

$$\omega_j = \Delta\psi_j + \mathrm{F}\left(\psi_i - \psi_j\right), \ \mathrm{i}=3-j, \quad (2)$$

где индекс j указывает номер слоя чис-

ленной модели и изменяется от 1 до 2, где ψ_j – функция тока в слое j, ω_j – завихренность в слое j, λ_j – коэффициент придонного трения, δ_{ji} – символ Кронекера, δ_{ji}= 0 при $i \neq j$ и δ_{ji} = 1 при $i = j$, D_j – диссипация, W_j – поток завихренности, генерируемой ветром, F_j – параметры стратификации для каждого из слоев, Δ – оператор Лапласа, при следующих параметрах стратификации F_1= 1933, F_2 = 50, при этом масштаб Россби в размерном виде равен 86 км. Расчеты в каждом из численных экспериментов были выполнены для размерного модельного времени 4000 суток.

Диссипация в модели реализована посредством включения в расчетную схему бигармонической вязкости, для нижнего слоя также используется придонное трение. Уравнения модели были стандартным образом приведены к безразмерному виду, и расчеты выполнялись в квадратной области с длиной стороны 2π. Положительные значения оси X соответствуют направлению на восток, положительные значения оси Y соответствуют направлению на север.

В модели ставятся граничные условия не протекания и скольжения.

Численная схема. Для решения основного уравнения задачи (1) применена схема Аракавы [3].

Решение системы уравнений (2) на каждом шаге выполнялось с помощью прямого метода интегрирования путем разложения полей функции тока и относительной завихренности по собственным функциям дифференциального оператора задачи для прямоугольных (квадратных) областей [4].

Структура ветрового воздействия представлена потоком завихренности, задаваемым выражением

$$W_1 = -W_0 sin(y). \qquad (3)$$

В такой постановке задачи предполагается, что пространственный масштаб поля ветра в зональном направлении больше размера расчетной области, что обеспечивает изменчивость поля ветровой нагрузки только в меридиональном направлении, тем самым та часть расчетной области, в которой предполагается формирование либо реально формируется струйное течение возле западного берега акватории подвержено воздействию ветра в той же степени, как и вся расчетная область.

Численные эксперименты. Численные эксперименты выполнялись в квадратной расчетной области с разрешением 513 узлов сетки по каждой из сторон квадрата. Эксперименты проводились при безразмерных параметрах β = 1, шаг по времени был равен 0,05 безразмерной единицы. Расчеты выполнены для параметров придонного трения λ_3= 0,03 и интенсивности потока ветровой завихренности W_0 = 0,001.

Если размер расчетной области по аналогии с [1, 2] принять равным 3840 км, то масштаб длины L = 611 км, тогда, при $\beta = 1{,}9 \cdot 10^{-11}$ м$^{-1}$с$^{-1}$, масштаб скорости равен U = 7,09 м/с, а масштаб времени T = 1,0 суток, пространственный шаг сетки расчетной области при данном разрешении равнялся 7,5 км. Как уже было указано выше, расчеты выполнялись с использованием бигармонической вязкости в качестве диссипативного члена уравнения (1), значения безразмерного коэффициента вязкости для обоих слоев j = 1, 2 в описанных ниже экспериментах было выбрано равным $2{,}4 \cdot 10^{-10}$.

В качестве начального поля для серии экспериментов было выбрано поле течений с распавшимся струйным течением в окружении интенсивного поля вихрей, рис. 1, номера экспериментов указаны в подписях к рисункам, поле ветрового воздействия, заданного формулой (3), приведено на рис. 2.

В последующих численных экспериментах была применена ветровая нагрузка такого типа, что поле воздействия ветра занимало только половину расчетной области, а на остальном пространстве этой области поле ветра было тождественно равно нулю.

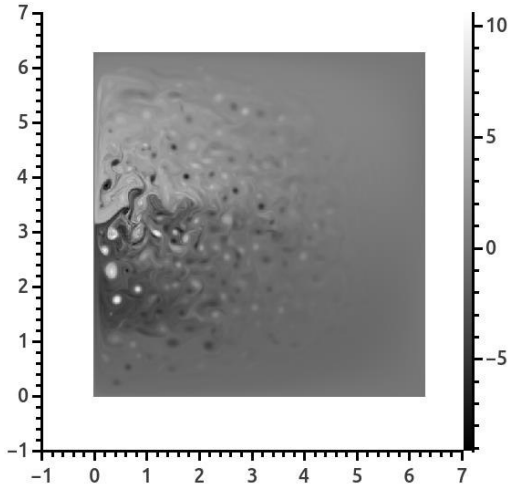


Рис. 1. Начальное поле завихренности верхнего слоя
Fig. 1. Initial vorticity field of upper layer

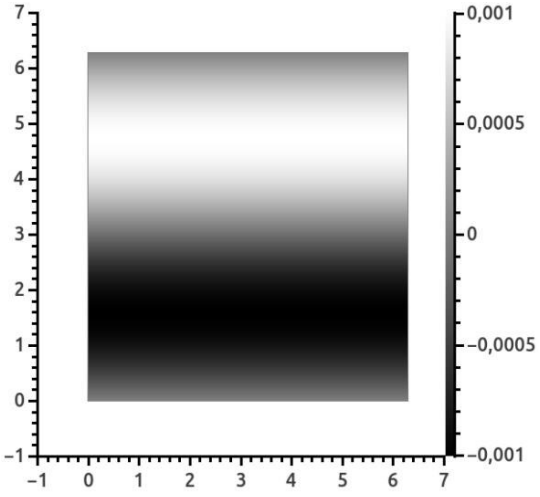


Рис. 2. Структура поля ветровой нагрузки № 1
Fig. 2. Wind stress field № 1

Ниже на рис. 3 представлено поле относительной завихренности для верхнего слоя при прогностическом расчете системы течений на 4000 суток с пространственнным распределением ветровой нагрузки № 1, рис. 2.

Последующие эксперименты выполнялись последовательно с локализацией воздействия ветра в западной № 2, центральной № 3 и восточной № 4 частях расчетной области. С целью сохранения баланса суммарной интенсивности ветра амплитуда поля потока завихренности в трех последующих расчетах была увеличена вдвое по сравнению с расчетом № 1.

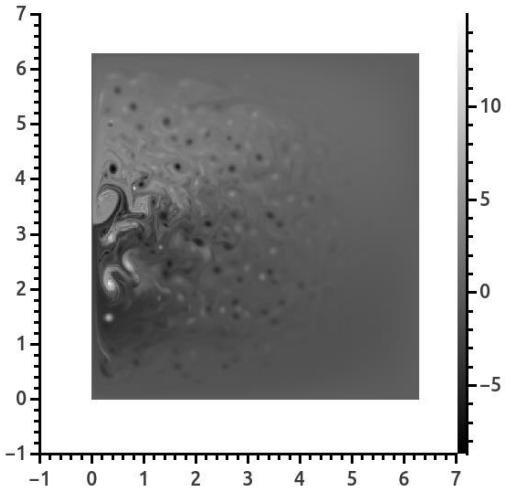


Рис. 3. Поле завихренности верхнего слоя № 1
Fig. 3. Vorticity field of upper layer № 1

На рис. 4 представлено поле ветра и на рис. 5 представлено поле относительной завихренности верхнего слоя при численном расчете на 4000 суток, расчет № 2.

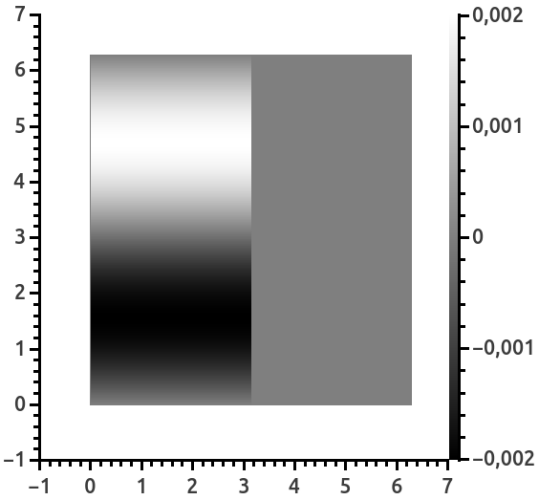


Рис. 4. Структура поля ветровой нагрузки № 2
Fig. 4. Wind stress field № 2

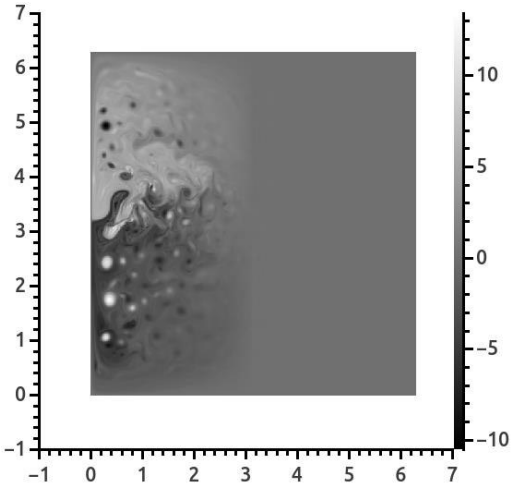


Рис. 5. Поле завихренности верхнего слоя № 2
Fig. 5. Vorticity field of upper layer № 2

На рис. 6 и 7 представлены соответственно поле ветровой нагрузки и поле относительной завихренности верхнего слоя при численном расчете на 4000 суток, расчет № 3.

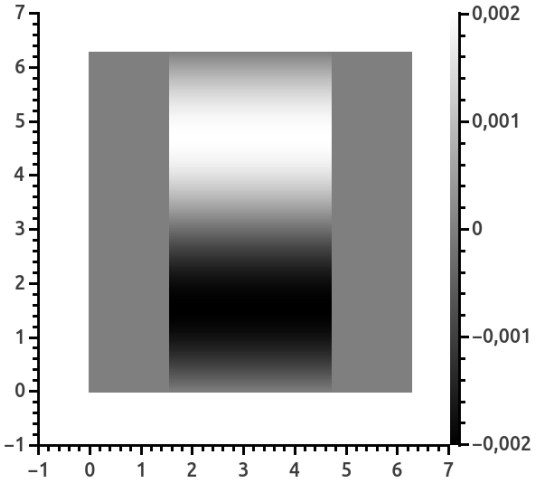


Рис. 6. Структура поля ветровой нагрузки № 3
Fig. 6. Wind stress field № 3

Сравнение полей на рис. 5 и рис. 7 демонстрирует отсутствие интенсивных значений поля завихренности к востоку от области ветрового воздействия, на рис. 7 отчетливо видно формирование струйного течения при том, что экстремальные значения циклонической и антициклонической завихренности оказываются близки в том и другом случае.

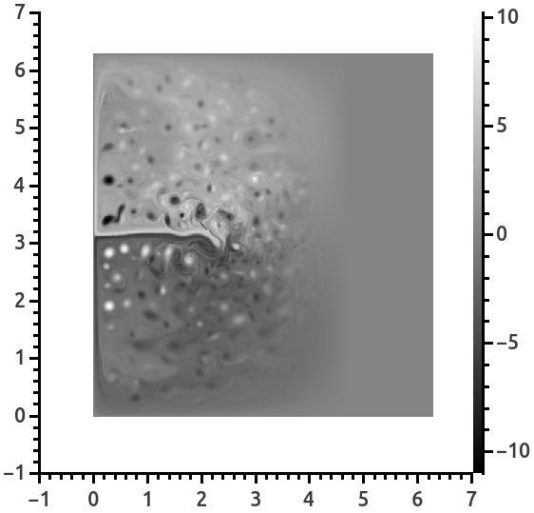


Рис. 7. Поле завихренности верхнего слоя № 3
Fig. 7. Vorticity field of upper layer № 3

На рис. 8 представлено поле ветра и на рис. 9 представлено поле относительной завихренности верхнего слоя при численном расчете на 4000 суток, расчет № 4.

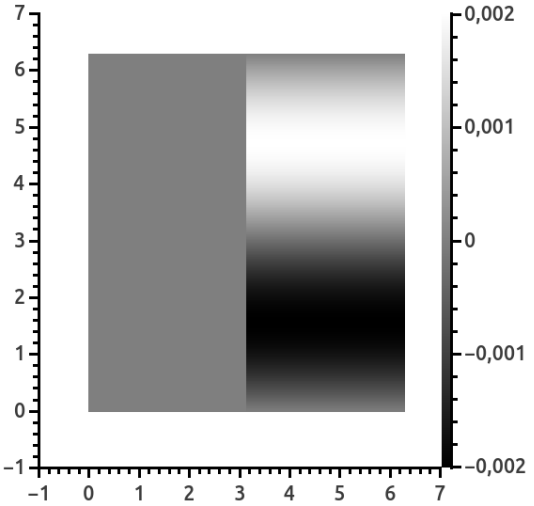


Рис. 8. Структура поля ветровой нагрузки № 4
Fig. 8. Wind stress field № 4

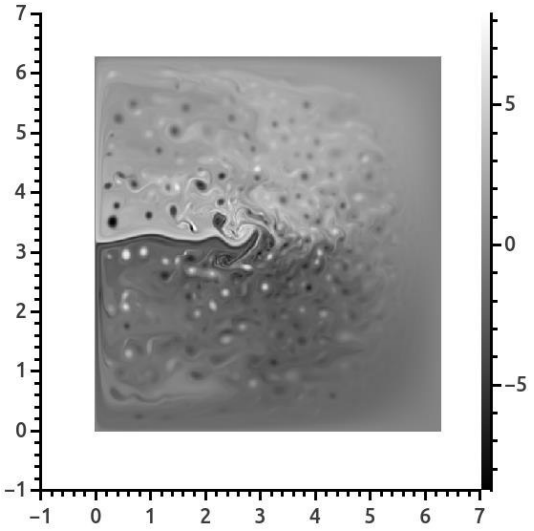


Рис. 9. Поле завихренности верхнего слоя № 4
Fig. 9. Vorticity field of upper layer № 4

Хорошо видно развитое струйное течение, протяженность струи здесь максимальная из всех проведенных экспериментов.

Заключение. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования океана на стадии эволюции поля течений под действием пространственно неоднородного ветра, локализованного в трех различных зональных сегментах расчетной области и ветра, изменяющего свою интенсивность только в меридиональном направлении при постоянных параметрах диссипации: придонного трения и коэффициента бигармонической вязкости. Показано, что формирование интенсивного струйного течения в океане вблизи западного берега существенно зависит от локализации ветрового воздействия. В частности установлено, что при одной и той же интенсивности ветра и одной и той же протяженности области ветрового воздействия в зональном направлении формирование наиболее интенсивного струйного течения происходит при ветровом воздействии в восточной части акватории, менее интенсивно при центральной локализации и формирование струйного течения не произошло при ветровом воздействии в западной части расчетной области.

На рис. 10 приведены нормированные пространственные спектры энергии начального поля течений (черный цвет) и поля ветра (красный цвет).

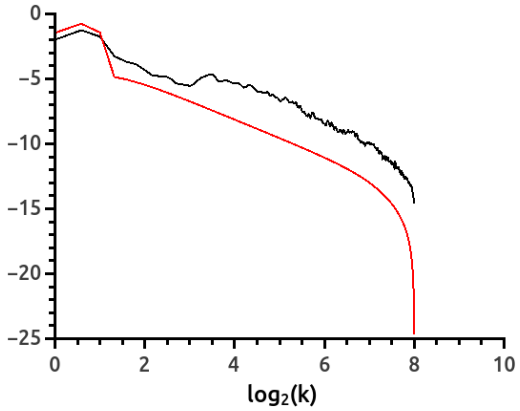


Рис. 10. Пространственные спектры начального поля течений (черный) и ветрового воздействия (красный)
Fig. 10. Space spectra for initial current field (black) and wind action (red)

Пространственные спектры на рис. 10 показывают, что основное ветровое воздействие на океан сосредоточено на масштабах малых волновых чисел, сравнимых с размером расчетной области, в то время как в поле течений развивается каскадный перенос энергии и энстрофии в малые масштабы с последующей диссипацией. Таким образом океан аккумулирует энергию внешних воздействий и формирует структуру течений в соответствии с законами геофизической гидродинамики. Как видно из постановки задачи обратное воздействие процессов в океане на состояние атмосферы моделью не описывается. Таким образом, основываясь на результатах работы, можно предположить, что процессы самоорганизации системы крупномасштабной циркуляции [2] достаточно чувствительны к внешним воздействиям на систему течений вблизи западного берега океана. В связи с изложенным возникает резонный

вопрос о разрушении существующих струйных течений под воздействием интенсивного ветра в непосредственной близости к западному берегу акватории и об оценке характерного времени такого разрушения, что может оказаться принципиально важным фактором исследования изменения климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shevchenko Igor, Berloff Pavel.* On the role of baroclinic modes in eddy-resolving midlatitude ocean dynamics // Ocean Modeling. 2017. Vol. 111. P. 55–65.

2. *Федотов А.Б.* Долгопериодная изменчивость системы крупномасштабной циркуляции океана и мезомасштабных вихрей как явление самоорганизации // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 3. С. 206–219. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).16

3. *Arakawa A.* Computational design of long-term numerical integration of the equations of fluid motion, two-dimensional incompressible flow // Journal of Comput. Physics. 1966. Vol. 1, № 1. P. 119–143.

4. *Roache Patrick J.* Computational fluid dynamics. Hermosa Publishers Albuquerque, N.M. 1972.

ANALYSIS OF THE FORMATION OF JET ZONAL FLOW AS AN ELEMENT OF OCEANIC CIRCULATION WITH DIFFERENT LOCALIZATION OF WIND ACTION

A.B. Fedotov

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

Within the framework of a numerical model of a two-layer ocean with a depth of layers corresponding to average oceanic conditions, a study of the evolution of large-scale circulation under the action of a stationary inhomogeneous external flow of vorticity in the meridional direction, simulating the effect of wind on the ocean, with different localization of wind load, was carried out. The experiments were performed for the same initial vorticity field formed with a numerical model using an explicit time integration scheme with constant dissipation parameters. Three main wind action localization were selected: near the western shore, in the central part of the settlement area and near the eastern shore. In all three experiments, the spatial structure of the external vorticity flow was identical. The paper analyzes the features of the formation of a jet stream near the western shore, depending on the localization of the wind load.
Keywords: synoptic variability, large-scale variability, wind-forced currents

REFERENCES

1. *Shevchenko Igor and Berloff Pavel.* On the role of baroclinic modes in eddy-resolving midlatitude ocean dynamics. *Ocean Modeling*, 2017, Vol. 111, pp. 55–65.

2. *Fedotov A.B.* Dolgoperiodnaya izmenchivost' sistemy krupnomasshtabnoj cirkulyacii okeana i mezomasshtabnyh vihrej kak yavlenie samoorganizacii (Long-period variability of large-scale circulation system and mesoscale vortices as self-organization phenomenon). *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2019, Vol. 47, No. 3, pp. 206–219. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(3).16

3. *Arakawa A.* Computational design of long-term numerical integration of the equations of fluid motion, two-dimensional incompressible flow. *Journal of Comput. Physics*, 1966, Vol. 1, No. 1, pp. 119–143.

4. *Roache Patrick J.* Computational fluid dynamics. Hermosa Publishers Albuquerque, N.M. 1972.

УДК 911.5+551.435.3 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-18-26

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТОВ МОРСКИХ БЕРЕГОВ

И.В. Агаркова-Лях[1], А.М. Лях[2]

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

Рассмотрена вертикальная и горизонтальная структура ландшафтов морских берегов. В их вертикальной структуре выявлено отсутствие некоторых компонентов береговых ландшафтов. Показано, что ветро-волновые процессы создают ритмичность условий и факторов развития береговых ландшафтов, высокую динамичность и пространственно-временную изменчивость их состояний и границ. Установлена микрозональность морфологической структуры ландшафтов, связанная с изменением интенсивности воздействия морских солей на береговые биоценозы. Выяснено, что с удалением от уреза воды возрастает видовое разнообразие, проективное покрытие и высота растительности; изменяется ее форма.

Ключевые слова: псевдолитораль, береговая линия, микрозональность, вертикальная и горизонтальная структура ландшафта, береговая растительность

Поступила в редакцию: 24.08.2022. После доработки: 12.09.2022.

Введение. Морские берега формируются в зоне взаимодействия крупнейших подсистем географической оболочки Земли – Суши и Мирового океана. Как известно, берег выступает в качестве многократной границы, на которой пересекаются или сближаются поверхности раздела (они же поверхности обмена) разной природы: вода, воздух, суша, дно, взвешенное и живое вещество и т.д. [1]. К границе «море – берег» относятся и важные реакции, происходящие на поверхности твердых тел, подвергающихся механическим воздействиям [2].

В 1979 г. обобщение исследований по биологии и экологии на внешних границах морей и океанов, и связанных с ними граничных эффектов, позволили Т.А. Айзатуллину с соавторами [1] представить зону контакта «море – берег» в качестве одной из активных поверхностей гидросферы. Позднее, Ю.П. Зайцев назвал внешние границы моря контурными биотопами и отметил, что они заселены специфическими контурными биоценозами. Среди последних он выделил аэроконтур, псаммоконтур, литоконтур, пелоконтур и потамоконтур [3, 4]. Однако, как справедливо отмечал Ю.П. Зайцев еще в начале XX в., «исследователи, в большинстве случаев, по-прежнему зондируют водную толщу пелагиали и, как правило, не уделяют специального внимания ее поверхности и береговым краевым сообществам» [2, с. 46]. За редким исключением, этот тезис актуален и для нынешнего состояния вопроса изучения контактной зоны «суша – море», когда экологические процессы, протекающие на внешних границах моря, остаются вне поля зрения ученых. В этой связи, назрела необходимость обобщения накопленных до настоящего времени данных об особенностях береговых ландшафтов, условия развития которых кардинально отличаются от смежных с ними ландшафтов суши и акваторий, что и определяет актуальность данного исследования.

Цель работы – выявить основные особенности ландшафтов, развивающихся на морских берегах. Для ее достижения решались две задачи: 1) обозначить ведущие факторы и процессы, определяющие развитие береговых ландшафтов; 2) рассмотреть специфику структуры береговых ландшафтов, отличных от

разделяемых ими наземных и морских ландшафтов.

Материалы и методы. В качестве источников выступили: опубликованные работы; материалы собственных наблюдений за растительностью крымских берегов с 1998 г. по настоящее время; ботанические информационные системы [5, 6]. Полученная информация обрабатывалась общенаучными и специальными методами: анализа и синтеза, индукции и дедукции, сравнительно-описательным, сравнительно-географическим, идентификации видов растений. В ходе полевых работ использовались методы: наблюдений, фотофиксации, ландшафтных и геоботанических описаний берегов и флоры на ключевых участках.

Термин «ландшафт» используется в работе не в таксономическом значении, а как комплексное и системное понятие, являющееся синонимом «природно-территориального комплекса», «природного комплекса», «природной геосистемы». Всецело поддерживая позицию парагенетического соразвития и парадинамического вещественно-энергетического взаимодействия между надводной и подводной частями береговой зоны моря, авторы сосредотачивают внимание на особенностях формирующихся на берегу ландшафтов. Специфика береговых ландшафтов рассматривается, главным образом, на материалах наблюдений бесприливных морей, к которым относится Черное море. Однако в некоторых случаях для полноты изучения вопроса привлекаются исследования литоральной зоны, развивающейся в условиях действия приливов и отливов.

Полученные результаты. Берег занимает особое место в составе морского побережья, представляя собой полосу суши, формы рельефа и накопления наносов которой созданы морем при его современном среднемноголетнем уровне (рис. 1) [7]. Гидродинамические границы берега в общем случае можно проводить по положению уреза воды в периоды минимальной и максимальной волновой активности: нижнюю – в штиль, при сгоне уровня или в отлив; верхнюю – в шторм, при нагоне уровня или в прилив. В условиях Черного моря более четкие границы берега определяются по гидродинамическим и геоморфологическим признакам: среднему положению линии уреза воды с одной стороны; перегибу профиля современной надводной террасы (на аккумулятивных берегах) или бровке активного клифа или абразионного уступа (на абразионных берегах) – с другой.

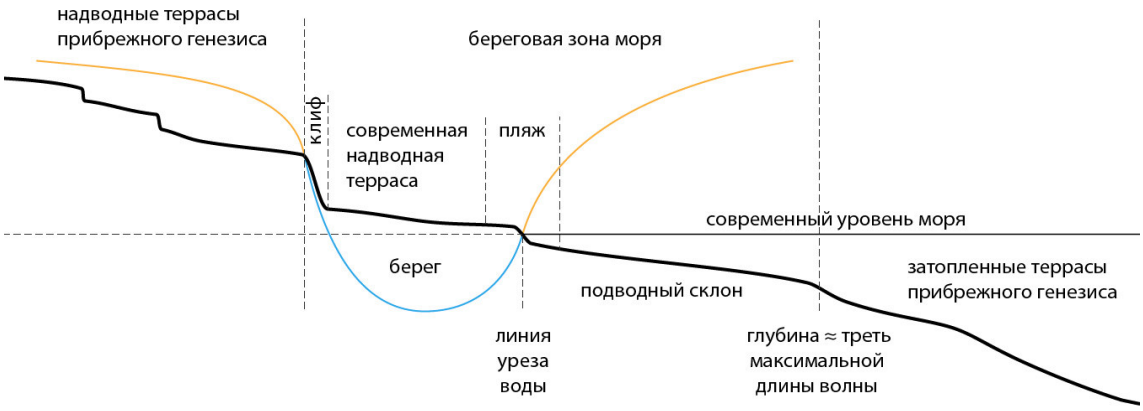


Рис. 1. Берег в составе морского побережья и оценка его условий обитания (по [8], с дополнением авторов): синим цветом показан диапазон стрессовых условий на берегу, красным – нормальные условия жизни наземных и водных организмов за пределами берега

Fig. 1. The place of the coast as part of the sea coast and assessment of its habitat conditions (according to [8], with the addition of the authors). Blue color shows the range of stressful living conditions on the shore, red – normal conditions for the habitat of terrestrial and aquatic organisms outside the shore

Вместе с количеством поступающего солнечного тепла, ведущим экологическим фактором на берегу выступают гидродинамические или волновые процессы. Гидродинамика контролирует особенности дифференциации на берегу обломочного материала, характер береговых процессов, расселение растительности, распределение зооценозов и т.д. В соответствии с характером волнового воздействия, на берегу выделяют зоны супралиторали (орошаемой брызгами прибоя) и литорали (приливов и отливов). На бесприливных морях литораль заменяется псевдолиторалью.

На берег вещество поступает из двух источников: с суши (с абразией; эоловыми, склоновыми и др. процессами) и из моря (с выносом обломочного и биогенного материала) (рис. 2). Волнение и течения перераспределяют вещество на берегу, формируя тот или иной тип береговой обстановки. Волнение, направленное по нормали к береговой линии, вызывает поперечное перемещение материала. Распространение волн под косым углом к берегу приводит к вдольбереговому движению наносов [9]. Промежуточное положение берега на геоморфологическом профиле представляет его и в качестве участка транзита вещества с суши в море (см. рис. 2).

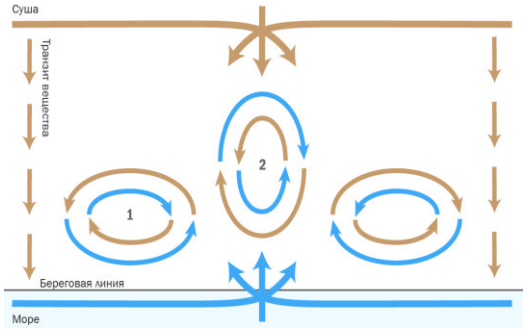


Рис. 2. Источники поступления и направление перемещения потоков вещества на берегу: (коричневый цвет – потоки с суши, синий цвет – потоки из моря. 1 и 2 – вдольбереговое и поперечное перемещение вещества)
Fig. 2. Sources of inflow and direction of movement of matter flows on the shore: (brown color – flows from land, blue color – flows from the sea. 1 and 2 – long-distance and transverse movement of the substance)

Направляющее действие на развитие берегов оказывают геолого-геоморфологические и тектонические факторы и процессы [10]. Завершают их формирование климато- и органогенные процессы. К неприродным факторам относится деятельность человека. Комплексное проявление этих процессов определяет характер вещественных потоков и обменные процессы, формируя структуру береговых ландшафтов.

Одним из индикаторов типа береговых ландшафтов выступает характер его растительности. Размещение береговой растительности контролируется типом пляжных отложений, рельефом, высотой над уровнем моря, литологией слагающих берега пород, шириной пляжа и удаленностью от уреза воды, где действуют два стрессовых фактора (морской прибой и засоление) [11].

Условия жизни на берегу довольно экстремальны: высокая инсоляция, интенсивное испарение, засоление, иссушение воздуха, ветровая деятельность, отсутствие почвенного покрова, низкая питательность и высокая подвижность субстрата. Все это вынуждает обитающие здесь растения вырабатывать адаптации [12].

Как известно, в структуре любого ландшафта выделяют вертикальную и горизонтальную составляющие. Ниже рассмотрим их особенности для морских берегов.

1. *Вертикальная структура ландшафтов морских берегов представлена не всеми компонентами ландшафта*. По вертикали в структуре береговых ландшафтов имеются следующие компоненты: геологическая основа (тектоническая структура и режим тектонических движений); береговой рельеф; состав горных пород и береговых отложений; водный горизонт (морская вода); микроклимат (инсоляция, испарение, воздушные массы, ветер, осадки); биота (растительность и животные). Почвы, как компонент ландшафта, на берегах отсутствуют, но в редких случаях могут быть представлены на примыкающих к суше участках. Растительность присутствует факультативно, в зависимости от типа

берега и интенсивности его волновой переработки.

2. *Простая ландшафтная структура*. Вертикальная структура ландшафта отражает его информационную насыщенность: чем больше в ней ярусов, горизонтов и природных тел, тем больше информации содержит ландшафт и тем сложнее его структура. Следствием неполной вертикальной структуры береговых ландшафтов и малой представленности ярусов и горизонтов является их более простая структура в сравнении с соседними наземными и сублиторальными ландшафтами.

3. *Высокая динамичность ландшафтов и их границ* вызвана гидродинамической активностью на берегу (ветро-волновой, штормовой, сгонно-нагонной, приливно-отливной). Со стороны суши динамичность ландшафтов и их границ проявляется развитием экзогенных процессов (склоновых, эоловых и пр.), имеющих неволновую природу.

4. *Ритмичность или цикличность условий и факторов* развития береговых ландшафтов связана с суточным, сезонным и многолетним режимами параметров микроклимата, ветро-волновой и экзогенной активности. Суточно-сезонная ритмичность вызвана неравномерным нагреванием суши и моря и формированием бризовой и сезонной ветровой циркуляции. В теплый период года отмечается низкая циклоническая и соответствующая ей штормовая активность, в холодный – напротив, высокая. Глобальные и региональные изменения в солнечной и циклонической активности связаны с космическо-планетарными силами и сказываются на многолетнем цикле гидродинамических и экзогенных процессов. На берегах приливных морей ритмичность развития береговых ландшафтов определяется режимом приливов и отливов.

5. *Пространственно-временная изменчивость состояний и границ ландшафтов* связана с высокой динамичностью водной среды в зонах прибойного потока и заплеска.

6. Местоположение на границе резко контрастных по своим физическим свойствам сред, определяет *концентрацию, трансформацию и диссипацию на берегу волновой энергии, образование и перемещение значительных объемов обломочного, биогенного и прочего материала*. Общая оценка диссипации механической энергии на мелководьях Мирового океана составляет около $6 \cdot 10^9$ кВт [9]. Интенсивный обмен веществом и энергией определяет сложность и недостаточную изученность происходящих здесь физико-географических процессов. Как отмечал Ю.П. Зайцев [2], волноприбойная зона Мирового океана вдоль всей его береговой линии является самым крупным механохимическим предприятием на Земле, однако оно «все еще остается белым пятном в наших знаниях» [2, с. 44].

Итогом граничного положения являются и *барьерные эффекты для живого вещества.* Берег выступает барьером для расселения наземных и водных растений и животных, вследствие чего здесь могут появляться новые их виды, ранее не характерные для этих условий. Семена и отдельные организмы могут попасть сюда с суши – транзитом с экзогенными процессами (эоловые, абразия, размыв, оползни, обвалы и др.), из моря (вынос семян, живых растений), с миграциями птиц, атмосферным переносом с воздушными массами и др. Еще одним источником привноса новых видов растений является человек, помогающий распространять синантропные и культурные растения. Так, автору данной работы однажды встретились на пляже проросшие семена арбуза и дыни; один из коллег сообщал о зреющем на пляже арбузе.

7. *Для горизонтальной или морфологической структуры береговых ландшафтов характерна полосчатость или микрозональность*, выраженная в форме размещения береговых отложений, растительности и животных.

В процессе выноса обломочного материала на берег, происходит его сортировка по гранулометрическому (размеру) и минеральному составу. В результате, на берегу формируются полосы или микрозоны с одинаковым составом отложений. Микрозональность в размещении растительности связана с ослаблением угнетающего влияния морской воды и ее брызг при удалении от береговой линии. Эта особенность отмечена, в частности, на пляжах острова Ольхон на Байкале [13], пляжах и косах п-ова Абрау на Кавказском побережье Черного моря [14]. На пляжах и пересыпях соленых озер Крыма также наблюдается микрозональная структура фитоценозов, наиболее ярко выраженная в условиях их высокого проективного покрытия (рис. 3 А, Б, В).



Рис. 3. Проявление микрозональности на берегах разного типа: А – Ветровая осушка у Донузлавской пересыпи (Тарханкутский п-ов); Б – Аккумулятивный берег у пос. Стерегущее (Каркинитский залив); В – Абразионный берег у пос. Черноморское (Тарханкутский п-ов); Г – Абразионно-обвальный берег у м. Айя (Юго-Западный Крым)

Fig. 3. The manifestation of microzonality or banding on the shores of different types: A – Wind drying near the settlement of Bellyaus (Tarkhankutsky peninsula); Б – Accumulative shore near the village. Guarding (Karkinit Bay); B – Abrasive coast near the village of Chernomorskoye (Tarkhankutsky peninsula); Г – Abrasive-avalanche coast near the Cape Aya (South-Western Crimea)

Своеобразная полосчатость в распределении растительности отмечается и на береговых обрывах Кавказа [15]. Исследователи называют ее концентрацией растений по стриям – трещинам в кристаллических породах. Это свойство проявляется и на обрывистых скальниках Южного берега Крыма (рис. 3 Г). Трещиноватость, моноклинальность и косослоистость залегания известняков и флишей в комплексе с селективной денудацией приводят к формированию в таких породах протяженных ниш или полок, где обитают фисташка туполистная (*Pistacia mutica* Fisch. & C. A. Mey), можжевельник высокий (*Juniperus excelsa* M. Bieb.), сосна Станкевича (*Pinus pityusa*) и крымская (*Pinus nigra subsp. pallasiana*) и др. В этих нишах-трещинах разгружаются подземные воды

и образуется мелкодисперсный субстрат для закрепления корневой системы.

На супра- и псевдолиторали Черного моря поясное развитие имеют синезеленые водоросли и представители макрозообентоса [16, 17]. Для скалистой литорали приливных морей характерна очень четкая стратификация растений и животных, образующих от трех до восьми и более поясов, основу каждого из которых составляет один-три доминирующих вида [18].

8. *Специфичность условий обитания на берегу (постоянное засоление, гидро- и литодинамическая активность) определяет необходимость наличия адаптаций у живущих здесь организмов.* Береговая биота испытывает физическое и химическое (механическое и солевое) воздействие. В результате, в зоне прибоя жизнь либо ограничена, либо представлена специфичными формами гидробионтов. Гидробионты адаптируются двумя основными способами: а) сопротивляться ударам волн и течений за счет прочности тела, присосок, прирастания к субстрату и пр.; б) «прогнуться» под условия среды и следовать движениям воды, как это делают водоросли [18]. Наибольшее разнообразие видов адаптаций наблюдается у обитателей литорали приливных морей.

Растительность на берегу также имеет особые морфо- и физиологические приспособления для жизни: корневую систему якорного или стержневого типа, механизмы борьбы с засолением, инсоляцией и испарением и пр. [12]. Например, растительность приморских бедлендов произрастает на очень динамичном рельефе и субстрате, поверхность которых снижается в результате делювиальных процессов [19]. В этих экстремальных условиях могут произрастать, главным образом, многолетние ксерофиты с глубокими и быстро растущими корнями, приспособленные к препарированию в верхней части (род каперсы *Capparis*).

Совокупность действующих на берегу экологических факторов среды (условий увлажнения, засоления, освещения, питания) определяет доминирование здесь таких экологических групп растений, как ксерофиты, галофиты, гелиофиты и олиготрофы. По предпочтению типа отложений среди них выделяются псаммофитные, литофитные или петрофитные растительные сообщества.

9. *Ослабление действия морских солей на биоту суши с удалением от оси береговой линии*. В общем случае, с удалением от линии уреза в направлении суши возрастает видовое разнообразие и проективное покрытие фитоценозов (рис. 4 А, Б). В береговой зоне п-ова Абрау в распределении растительности выявлены следующие особенности: ослабление ветра и морского засоления ведет к увеличению высоты древостоя от 1-2 до 14-16 м и кустарников от 0,2-0,5 до 1,5-3,0 м, изменению их формы – от стелющейся и флагообразной до нормальной [14].

Рассмотренные выше особенности выделяют береговые ландшафты среди расположенных по соседству наземных и аквальных ландшафтов и раскрывают их своеобразие как переходных ландшафтов.

Заключение. Основными факторами, ограничивающими развитие береговых ландшафтов, выступают волновая деятельность и морское засоление. Они же определяют формирование особенностей их вертикальной и горизонтальной структуры.

Для береговых ландшафтов типична неполная вертикальная структура: в них нет почв, растительность присутствует факультативно.

Ветро-волновые процессы обуславливают ритмичность условий и факторов развития береговых ландшафтов; высокую динамичность и пространственно-временную изменчивость их состояний и границ.

Для жизни на берегу растительность и животные выработали адаптации.



Рис. 4. Разреженная структура береговой растительности на черноморских берегах Крыма: А – Абразионный берег Тарханкутского п-ова у с. Марьино; Б – Аккумулятивный берег Каламитского залива у пос. Прибрежное
Fig. 4. Sparse structure of coastal vegetation of the Black Sea coast of Crimea: А – Abrasive coast of Tarkhankutsky peninsula near the village of Marino; Б - Accumulative coast of the Kalamitsky Bay near the village Pribregnoye

Морфологическая структура береговых ландшафтов характеризуется микрозональностью. Ослабление действия морских солей на наземную биоту происходит с удалением от оси береговой линии и приводит к повышению ее видового разнообразия и проективного покрытия, росту высоты древостоя и кустарников, изменению формы.

Отмеченные особенности выделяют береговые ландшафты среди смежных с ними ландшафтов суши и акваторий, и описывают их своеобразие как переходных ландшафтов.

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 ИнБЮМ № 121030100028-0 «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Айзатуллин Т.А., Лебедев В.Л., Хайлов К.М.* Океан. Активные поверхности и жизнь. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 192 с.

2. *Зайцев Ю.П.* Введение в экологию Черного моря. Одесса: Эвен, 2006. 224 с.

3. *Зайцев Ю.П.* Контурные сообщества морей и океанов. Фауна и гидробиология шельфовых зон Тихого океана: Материалы XIV Тихоокеанского научного конгресса (Хабаровск, август 1979). Владивосток, 1982. С. 51–54.

4. *Зайцев Ю.П.* Самое синее в мире. Нью-Йорк: Изд-во ООН, 1998. 142 с.

5. *Плантариум.* Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. 2007–2022. [Электронный ресурс] URL: https://www.plantarium.ru

6. *The Plant List.* Version 1.1. Published on the Internet. [Электронный ресурс] URL: http://www.theplantlist.org

7. *Морская* геоморфология: Терминол. справ. Береговая зона: процессы, понятия, определения / под ред. В.П. Зенковича, Б.А. Попова. М.: Мысль, 1980. 280 с.

8. *Шуйський Ю.Д.* Типи берегів Світового океану. Одеса: Астропринт, 2000. 480 с.

9. *Сафьянов Г.А.* Геоморфология морских берегов. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 1996. 400 с.

10. *Лымарев В.И.* Основные проблемы физической географии океана. М.: Мысль, 1978. 248 с.

11. *Агаркова-Лях І.В.* Парагенетичні ландшафтні комплекси берегової зони моря (на прикладі чорноморського узбережжя Криму): автореф. дис. … канд. геогр. наук. Сімферополь. 2006. 21 с.

12. *Агаркова-Лях И.В., Фролова К.В., Лях А.М.* Адаптации береговой растительности к экологическим условиям контактной зоны «суша-море» // Системы контроля окружающей среды. 2022. Вып. 2 (48). С. 73–83. DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-73-83.

13. *Касьянова Л.Н.* Состав и структура растительности песчаных пляжей и дюнных песков острова Ольхон (озеро Байкал) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2014. № 13. С. 99–102.

14. *Макалова П.Г., Папунов В.Г., Петрушина М.Н.* Ландшафтная структура береговой зоны полуострова Абрау // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: материалы XII Междунар. ландшафтной конф.: в 3 т. Тюмень: Тюменский государственный университет, 2017. С. 211–216.

15. *Алейникова А.М., Липка О.Н., Крыленко М.В.* Ландшафтная структура береговых обрывов черноморского побережья Кавказа // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2019. Т. 27. № 4. С. 298–306.

16. *Садогурская С.А., Белич Т.В., Садогурский С.Е.* Вертикальное распределение Cyanobacteria морской каменистой супралиторали м. Кильсе-Бурун (п-в Меганом, Черное море) // Биология растений и садоводство: теория, инновации. 2021. № 4 (161). С. 27–35.

17. *Копий В.Г., Бондаренко Л.В.* Атлас обитателей псевдолиторали Азово-Черноморского побережья Крыма. Севастополь: ФИЦ ИнБЮМ, 2020. 120 с.

18. *Петров К.М.* Биономия океана. Спб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2004. 242 с.

19. *Корженевская Ю.В.* Аккумуляционно-денудационные процессы как фактор ценозообразования (на примере некоторых растительных сообществ Крыма): автореф. дис. … канд. биол. наук. Ялта, 1999. 19 с.

FEATURES OF THE STRUCTURE OF MARINE COASTAL LANDSCAPES

I.V. Agarkova-Lyakh[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

The landscape structure of the seashores is formed in direct dependence on the nature of the material exchange between land and sea. It is revealed that not all landscape components are represented in the vertical structure of coastal landscapes. Wind-wave processes determine the rhythmicity of conditions and factors of development of coastal landscapes; high dynamism and spatial-temporal variability of their states and boundaries. The morphological structure of landscapes is characterized by banding or microzonality. The living organisms inhabiting these areas have specific adaptations. With the distance from the coastline and the reduction of the oppressive effect of the sea, the species diversity, and the projective vegetation cover increase.

Keywords: pseudolitoral, shoreline, microzonality, vertical and horizontal structure of landscapes, coastal vegetation

REFERENCES

1. *Ajzatullin T.A., Lebedev V.L., and Hajlov K.M.* Okean. Aktivnye poverhnosti i zhizn' (Ocean. Active surfaces and life). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, 192 p.
2. *Zajcev Ju.P.* Vvedenie v jekologiju Chernogo morja (Introduction to the ecology of the Black Sea). Odessa: Jeven, 2006, 224 p.
3. *Zajcev Ju.P.* Konturnye soobshhestva morej i okeanov (Contour communities of seas and oceans), Fauna i gidrobiologija shel'fovyh zon Tihogo okeana (Fauna and Hydrobiology of the Pacific Ocean shelf zones), Proc. XIVth Pacific Scientific Congress (Habarovsk, Aug. 1979), Vladivostok, 1982, pp. 51–54.
4. *Zajcev Ju.P.* Samoe sinee v mire (The bluest in the world). New York: Izd-vo OON, 1998, 142 p.
5. https://www.plantarium.ru
6. http://www.theplantlist.org
7. *Zenkovich V.P. and Popov B.A.* Morskaja geomorfologija: Terminol. sprav. Beregovaja zona: processy, ponjatija, opredelenija (Marine geomorphology: Terminol. help. Coastal zone: processes, concepts, definitions). Moscow: Mysl', 1980, 280 p.
8. *Shujs'kij Ju.D.* Tipi beregiv Svitovogo okeanu (Types of coast of the World Ocean). Odesa: Astroprint, 2000, 480 p.
9. *Saf'janov G.A.* Geomorfologija morskih beregov (Geomorphology of sea shores). Moscow: MGU im. M.V. Lomonosova, 1996, 400 p.
10. *Lymarev V.I.* Osnovnye problemy fizicheskoj geografii okeana (Basic problems of physical geography of the ocean). Moscow: Mysl', 1978, 248 p.
11. *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). Cand. geogr. sci. thesis), Simferopol', 2006, 21 p.
12. *Agarkova-Ljah I.V., Frolova K.V., and Ljah A.M.* Adaptacii beregovoj rastitel'nosti k jekologicheskim uslovijam kontaktnoj zony «susha-more» (Adaptation of coastal vegetation to ecological conditions of the contact zone “land-sea”). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2022, No. 2 (48), pp. 73–83. DOI: 10.33075/2220-5861-2022-2-73-83.
13. *Kas'janova L.N.* Sostav i struktura rastitel'nosti peschanyh pljazhej i djunnyh peskov ostrova Ol'hon (ozero Bajkal) (Composition and structure of vegetation of sandy beaches and dune sands of Olkhon Island (Lake Baikal)). *Problemy botaniki Juzhnoj Sibiri i Mongolii,* 2014, No. 13, pp. 99–102.
14. *Makalova P.G., Papunov V.G., and Petrushina M.N.* Landshaftnaja struktura beregovoj zony poluostrova Abrau (Landscape structure of the coastal zone of the Abrau peninsula), Landshaftovedenie: teorija, metody, landshaftno-jekologicheskoe obespechenie prirodopol'zovanija i ustojchivogo razvitija (Landscape studies: theory, methods, landscape and ecological support of nature management and sustainable development), Proc. XIIth International Landscape Conference: in 3 volumes, Tyumen: Tyumen State University, 2017, pp. 211–216.
15. *Alejnikova A.M., Lipka O.N., and Krylenko M.V.* Landshaftnaja struktura beregovyh obryvov chernomorskogo poberezh'ja Kavkaza (Landscape structure of coastal cliffs of the Black Sea coast of the Caucasus). *Vestnik RUDN, Serija: Jekologija i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*, 2019, Vol. 27, No. 4, pp. 298–306.
16. *Sadogurskaja S.A., Belich T.V., and Sadogurskij S.E.* Vertikal'noe raspredelenie Cyanobacteria morskoj kamenistoj supralitorali m. Kil'se-Burun (p-v Meganom, Chernoe more) (Vertical distribution of Cyanobacteria of the marine rocky supralithoral Cape Kilse-Burun (Meganom peninsula, Black Sea)) // *Biologija rastenij i sadovodstvo: teorija, innovacii,* 2021, No. 4 (161), pp. 27–35.
17. *Kopij V.G. and Bondarenko L.V.* Atlas obitatelej psevdolitorali Azovo-Chernomorskogo poberezh'ja Kryma (Atlas of the inhabitants of the pseudo-urals of the Azov-Black Sea coast of Crimea). Sevastopol': FIC InBJuM, 2020, 120 p.
18. *Petrov K.M.* Bionomija okeana (Bionomy of the Ocean). Saint-Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2004, 242 p.
19. *Korzhenevskaja Ju.V.* Akkumuljacionno-denudacionnye processy kak faktor cenozoobrazovanija (na primere nekotoryh rastit. soobshhestv Kryma): avtoref. dis. kand. biol. nauk (Accumulation-denudation processes as the factor of formation of cenoses (by the example of some plant communities of the Crimea). Synopsis of Cand. bio. sci. thesis), Yalta, 1999, 19 p.

УДК 574.24:504.064.36 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-27-36

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И РАЗМЕРНЫЙ СОСТАВ ПОСТЛИЧИНОК МИДИИ *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* НА КОНТРОЛЬНЫХ СУБСТРАТАХ В ПРИБРЕЖНЫХ ВОДАХ ЮЖНОГО И ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА

И.И. Казанкова

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

Изучали размерный состав и распределение постличинок мидий на контрольных субстратах с ворсистой поверхностью, используемых в мониторинге потенциальной пополняемости черноморской популяции мидии *Mytilus galloprovincialis* у берегов Крыма в слое воды 3–15 м. Отмечена повышенная средняя плотность «посадки» постличинок мидии на 4–8 крайних нитях нижней и верхней частей субстрата. В некоторых случаях превышение над плотностью постличинок в средней части здесь было семикратным. Определено, что для исследованных районов массовое вторичное оседание на контрольные субстраты постличинок мидий (длиной более 2,0 мм) не характерно.
Ключевые слова: мидия, личинки, постличинки, пополняемость, вертикальная миграция, краевой эффект, вторичное оседание

Поступила в редакцию: 12.08.2022. После доработки: 14.09.2022.

Введение. Стадия постличинки у мидии начинается после метаморфоза планктонной личинки, осевшей на субстрат. Постличинки мидии – это бентосные особи, сохранившие некоторые личиночные особенности в строении тела: микроскопические размеры (от 0,25 мм), тонкую просвечивающуюся раковину с хорошо различимым продиссоконхом II, светочувствительные глазки. На этой стадии развития происходит нарастание диссоконха, и особь приобретает вытянутую «мидийную» форму. В исследованиях постличинками считаются бентосные особи мидий длиной до 2–3 мм [например, 1, 2].

В настоящее время в некоторых районах Мирового океана отмечается устойчивая тенденция уменьшения пополняемости популяций мидий постличинками или значительной флуктуации этого параметра [например, 3, 4]. Исследователи это связывают с климатическими изменениями, и Черное море в этой связи не является исключением [5–7]. При контроле пространственно-временной изменчивости потенциала пополняемости популяций мидий используются унифицированные искусственные субстраты: гладкие пластинки [8–12] или субстраты, образованные нитевидными структурами или имеющие их на своей поверхности [4, 13–17]. Субстраты с нитчатыми структурами позволяют более точно измерить потенциальную пополняемость, так как филаменты не только увеличивают площадь поверхности субстрата [18], но дают возможность оседать на них молодым педивелигерам, предпочитающим нитчатые структуры гладкой поверхности, в отличие от более зрелых педивелигеров, не имеющих такой избирательности к субстрату и способных успешно оседать на гладкую поверхность [19–21].

Приведенные способы исследования не исключают ошибок в учете постличинок мидий, так как нельзя игнорировать способности постличинок к активному переползанию с субстрата на окружающие его поверхности и наоборот. Установлено, например, что постличинки мидии *Mytilus galloprovincialis* Lamark, 1819, могут свободно перемещаться по различным поверхностям независимо от их качества [1]. Кроме того, на поверхности контрольного субстрата могут оказаться перенесенные водой постличинки мидий, сформировавшиеся ранее

в других местах и способных к вторичному оседанию [22].

Целью данной работы было выявить возможность вертикального перемещения постличинок мидии *M. galloprovincialis*, их вторичного оседания путем исследования пространственного распределения постличинок на поверхности контрольного субстрата и их размерного состава.

Материал и методы. Анализировали данные, полученные при исследовании потенциальной пополняемости черноморской популяции мидии *M. galloprovincialis* у южных и юго-западных берегов Крыма в 2008–2014 гг. и в 2017–2021 гг. В качестве контрольных субстратов с ворсистой поверхностью использовали акриловые нити [13]. Они были расположены плотными параллельными рядами в виде однослойной кольцевой полоски шириной 1,5–3,0 см на цилиндрическом пластиковом каркасе, закрепленном на тонком фале, проходящем сквозь него (рис. 1).

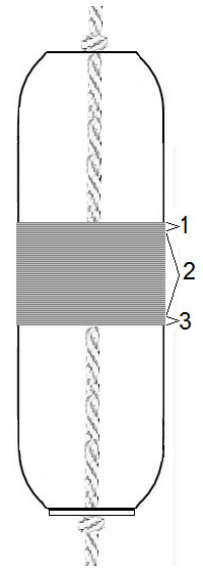


Рис. 1. Контрольный субстрат с ворсистой поверхностью из акриловых нитей на пластиковом каркасе. 1, 2, 3 – верхняя, средняя и нижняя части контрольного субстрата соответственно
Fig. 1. Control substrate with a hairy surface of acrylic threads on a plastic frame. 1, 2, 3 – upper, middle and lower parts of the control substrate respectively

Субстраты экспонировали в толще воды на горизонтах глубины 1–3, 7–9 и 11–15 м соответственно в Ласпинской бухте, в эстуарной зоне Севастополя и в Голубом заливе, что близ пгт. Кацивели (рис. 2). Глубина станций достигала в Голубом заливе – 25 м, Ласпинской бухте – 20 м, в эстуарной зоне Севастополя – 15 и 3–4 м.



Рис. 2. Район исследования
Fig. 2. Study area

Анализировали результаты экспозиций, в которых пополняемость превышала 1,0 экз.·см$^{-2}$·месяц$^{-1}$. Их количество составило 63, из них 22 – в Голубом заливе, 18 и 23 – в Ласпинской и севастопольских бухтах соответственно. Повышенная потенциальная пополняемость наблюдалась в разные годы в различные сезоны, исключая период, длящийся с конца июня по первую половину октября. Продолжительность экспозиций находилась в диапазоне 24–120 суток и составляла в среднем 48 суток.

Подсчет постличинок на субстратах осуществляли с помощью бинокулярного микроскопа при увеличении около 16 раз, учитывая количество особей на каждой нити по отдельности или на 2–8 рядом расположенных нитях вместе взятых, иногда через такие же промежутки.

Размерный состав постличинок исследовали в выборках численностью от 50 до 100 и более особей, используя окулярную линейку с ценой деления около 50 мкм.

Результаты. *Вертикальное распределение постличинок мидии на контрольных субстратах.* При анализе выделяли три части субстрата: верхнюю, нижнюю части, содержащие всего по 4–8

нитей каждая, и большую среднюю часть, состоящую из остальных нитей. Как видно из рис. 3, плотность «посадки» постличинок мидии – выраженная в числе особей на одной или нескольких нитях – была неравномерной. Ее величина могла быть повышенной в верхней и нижней частях субстрата и пониженной в его средней части.

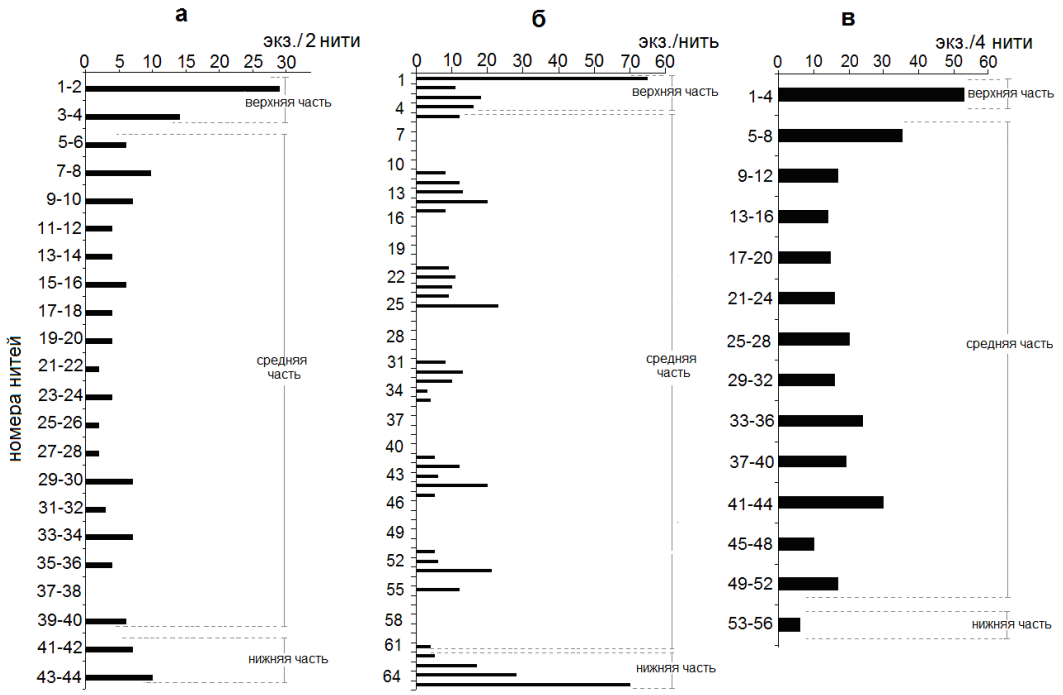


Рис. 3. Плотность постличинок мидий в верхней, средней и нижней частях субстрата
Fig. 3. Density of mussel postlarvae in the upper, middle and lower parts of the substrate

Всего было рассмотрено 47 распределений плотности постличинок на субстрате: 19 из них относились к Голубому заливу, 11 и 17 – Ласпинской и севастопольским бухтам соответственно. Во всех рассмотренных случаях вертикального распределения мидий по поверхности субстратов отношение средней плотности постличинок в верхней части к таковой средней части (В/С) было выше единицы (рис. 4).

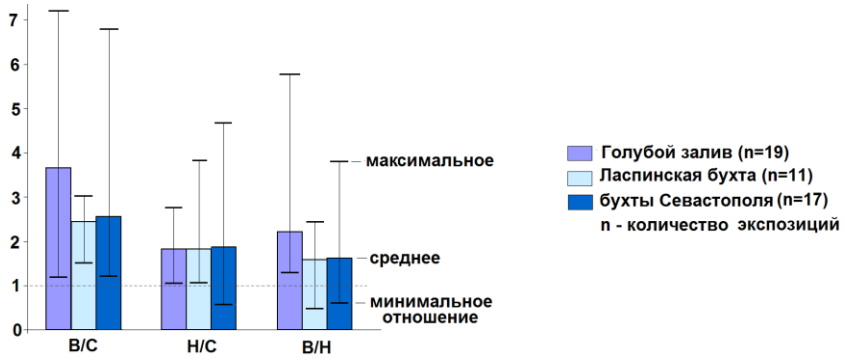


Рис. 4. Отношения между плотностью постличинок мидии в верхней и средней (В/С), нижней и средней (Н/С), верхней и нижней (В/Н) частях субстратов
Fig. 4. Relationships between the density of mussel post-larvae in the upper and middle (B/C), lower and middle (H/C), upper and lower (B/H) parts of substrates

Максимально это превышение было 7-кратным. Отношение плотности мидий нижней и средней части (Н/С) в 100% случаев было выше единицы только в районе Южного берега Крыма, в севастопольских бухтах в 18% случаев оно оказалось ниже единицы. Превышение плотности мидий в верхней части субстрата над таковой в его нижней части в 100% случаев наблюдалось только в Голубом заливе (максимально почти в 6 раз), в 72% – в районе Ласпи и Севастополя. В среднем отношения В/С, Н/С и В/Н составило 2,98; 1,85 и 1,85 соответственно.

Таким образом, в вертикальном распределении постличинок мидий на контрольных субстратах наблюдается хорошо выраженный краевой эффект, особенно, в его верхней части.

Размерный состав постличинок мидий на контрольных субстратах. По результатам 47 экспозиций исследовали распределение численности мидий по размерным группам. Минимальный размер постличинок мидии на контрольных субстратах составлял 0,25 мм, что соответствует минимальному размеру педивелигеров мидий, способных к оседанию [17].

На рис. 5 представлено четыре типичных распределений мидий по размерным группам (рис. 5 а – г).

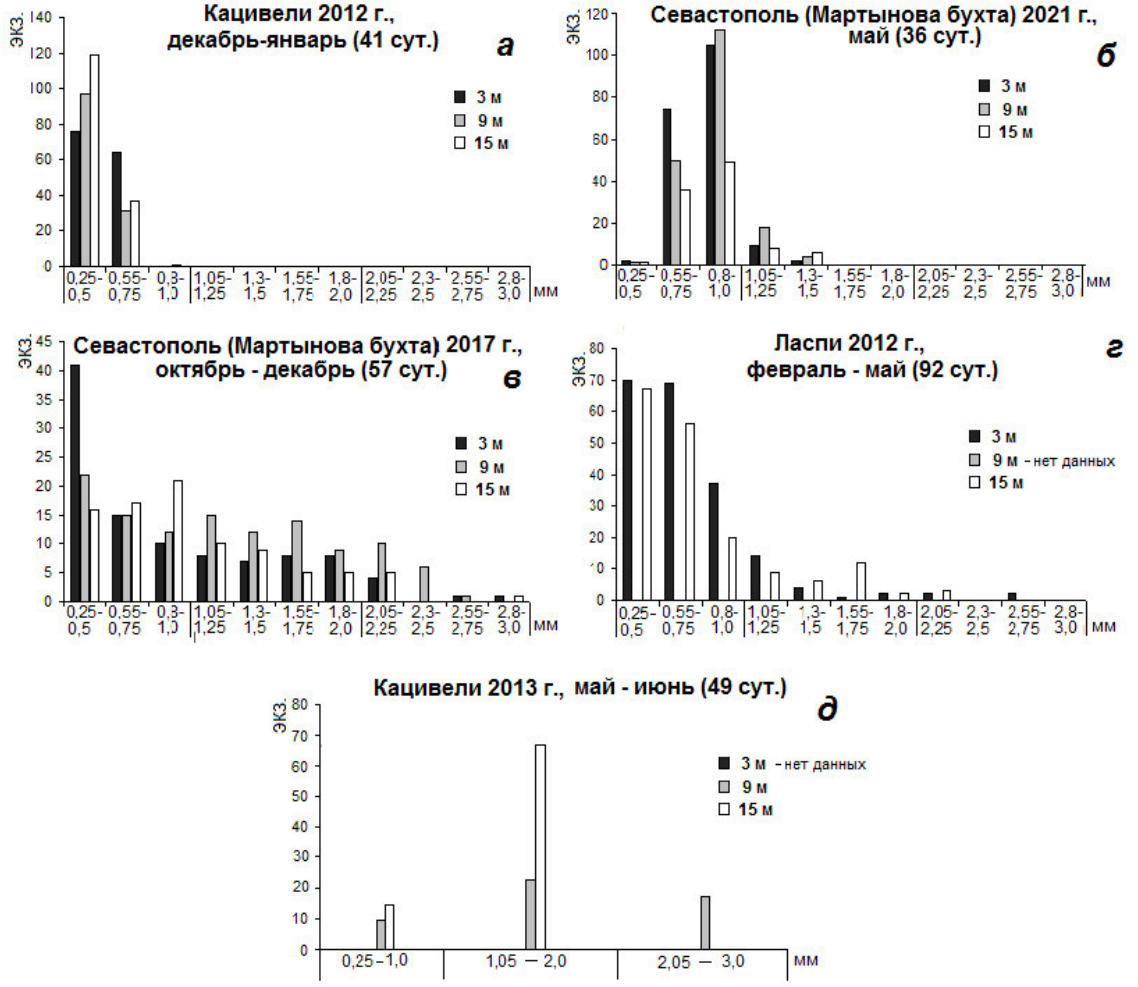


Рис. 5. Примеры размерных составов постличинок мидии на контрольных субстратах
Fig. 5. Examples of size compositions of mussel post-larvae on control substrates

Наиболее многочисленными в выборках были особи длиной 0,25–1,0 мм. Внутри этой группы наблюдались варианты, когда по численности существенно превалировали мидии длиной 0,25–0,75 или 0,5–1,0 мм.

Как правило, мидии длиной более 2,0 мм на субстратах отсутствовали или были в незначительном количестве. Только в мае – июне 2013 г. в Голубом заливе численно доминировали особи с длиной раковины около 1-2 мм (рис. 5д).

Максимальные размеры постличинок мидии на контрольных субстратах в зависимости от продолжительности экспозиций. В экспозициях, длящихся менее 30 суток, максимальная длина постличинок мидий не превышала 1,5 мм (рис. 6). В более продолжительных экспозициях максимальные размеры мидий находились в диапазоне 0,7–2,8 мм.

В целом, в 33 случаях из 52 максимальные размеры мидий были ≤ 1,5 мм. В остальных 19 случаях – более 1,5 мм. При этом мидии с максимальной длиной раковины в диапазоне от 1,5 до 2,8 мм наблюдались как в относительно коротких (31–60 сут.), так и более продолжительных (70–120 сут.) экспозициях.

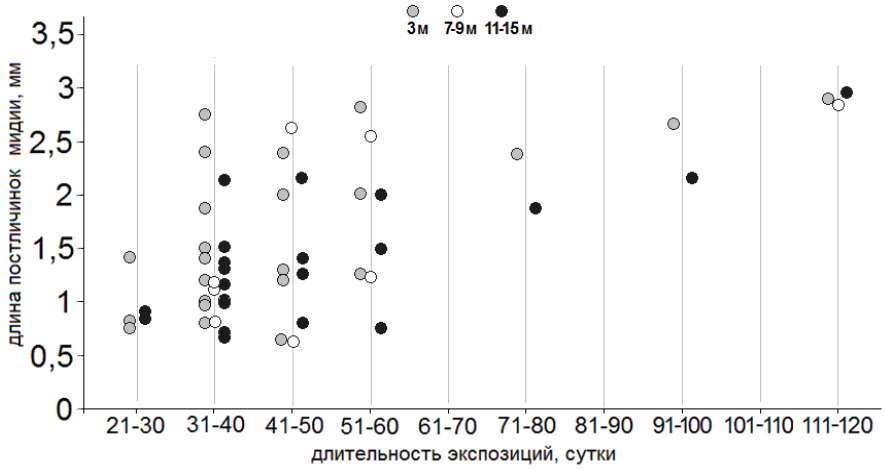


Рис. 6. Максимальная длина постличинок мидии в экспозициях различной длительности
Fig. 6. Maximum length of mussel post-larvae in exposures of various durations

Обсуждение. *Краевой эффект в вертикальном распределении постличинок.* В исследованиях по оседанию личинок обрастателей на стеклянные и железные пластины каких-либо пространственных предпочтений у мидий не отмечалось, в отличие от балянусов, концентрирующихся на нижней поверхности горизонтально расположенных пластин [8]. Возникновение краевого эффекта в распределении постличинок мидии на ворсистом субстрате можно объяснить наличием у них таксисов. Доказано, что планктонным личинкам мидий свойственны таксисы, связанные с градиентом освещенности, гравитации и давления, которые в зависимости от стадии развития личинок, могут меняться на противоположные [23]. Что касается постличинок мидий, то лабораторные исследования показали, что свободное их перемещение по субстрату происходит только в относительно спокойной воде, при возникновении тока воды мидии образовывают небольшие скопления в виде друз [1]. Также для постличинок мидии характерно перемещение вверх по вертикальным стенкам лабораторных сосудов [1, 21]. К этому следует добавить, что в дальнейшем особи, оказавшиеся у кромки воды, не стремятся переместиться вниз, несмотря на постепенное понижение уровня воды в сосудах из-за ее испарения и в последствии погибают (собственные наблюдения).

Возникновение повышенной концентрации постличинок мидии на верхних нитях контрольного субстрата может быть связано с преимущественным движением мидий, появившихся на субстрате, по направлению вверх, то есть к верхнему краю. Здесь они, возможно, могут лучше закрепиться, чтобы противостоять потоку воды, направляя бис-

сусные нити не только на ворсистый субстрат, но и на пластиковую поверхность каркаса. Концентрация мидий на нижнем крае контрольного субстрата, возможно, обусловлена миграцией осевших на нижнюю часть пластикового каркаса особей к нижней кромке контрольного субстрата, где также как и мидии верхнего края находят благоприятные условия для прикрепления.

Неравномерность распределения постличинок мидий на субстрате можно связать также с их различной выживаемостью особей в зависимости от места их расположения на субстрате. В любом случае обнаруженный краевой эффект свидетельствует о лучших условиях для жизнедеятельности постличинок на крайних частях ворсистого субстрата.

В связи с этим при подсчете постличинок субстрат следует рассматривать как одно целое, что, в принципе, является общепринятым. Если же для ускорения обработки пробы нити под бинокуляром просматриваются выборочно, то важно учитывать выявленное неравномерное распределения личинок по субстрату. Чтобы уменьшить возможное влияние смертности постличинок на контрольном субстрате или их миграции с поверхности пластикового каркаса и наоборот, необходимо сократить сроки экспозиции, например, до 20 суток. В ряде исследований по учету пополняемости популяциий мидий постличинками под влиянием факторов среды продолжительность экспозиций составляла всего несколько суток [12, 15].

Размерный состав постличинок мидий на контрольных субстратах. Различие размерных составов постличинок, представленных на рис. 5, можно объяснить неравномерностью оседания личинок в течение экспозиции и неоднородностью их размерно-возрастного состава. В последнем случае оседающие личинки могут быть представлены в разном соотношении молодыми педивелигерами (250 мкм) и педивелигерами на стадии задержки метаморфоза (термин из [19]), находящиеся в пелагиали длительный период и достигающие 400 мкм [10, 24].

Представленные на рис. 6 результаты совпадают с данными, полученными ранее, по которым в месячных экспозициях в период с ноября по июнь максимальные размеры мидий не превышают 1,5 мм [8]. В этих исследованиях, проведенных в середине прошлого века появление на субстрате крупных постличинок (2,0–2,7 мм) отмечалось в теплый период, а именно, в августе – октябре. Более поздние исследования показали, что в эти месяцы у берегов южного и юго-западного Крыма, включая бухты Севастополя, массово оседают личинки митилястера, постличинки которых легко спутать с мидиями [5]. Личинки мидий в июле – сентябре в исследованных районах практически не оседают, что совпадает также с результатами, полученными у берегов Адриатического моря [8].

Молодь мидии длиной от 2,0 до 6,8 мм встречались на стеклянных пластинках месячной экспозиции в теплый период года (июнь – октябрь) и в исследованиях Славиной О.Я. 1951–1955 гг. [25]. Появление столь крупных постличинок на субстратах месячной экспозиции может говорить в пользу возможности их вторичного оседания или переползания на контрольные пластинки с окружающих субстратов, куда они вселились ранее.

В представленных в настоящей статье результатах отмечен только один случай массового появления на субстрате особей длиной более 1,0 мм в результате полуторамесячной экспозиции (см. рис. 5 д), Вероятнее всего, это связано с комплексом обстоятельств, включающим оседание крупных педивелигеров в начале экспозиции, благоприятные условия для их роста и отсутствие последующего оседания.

Таким образом, в настоящее время массовое вторичное оседание мидий на контрольных субстратах у берегов южного и юго-западного Крыма маловероятно.

Выводы. 1. На контрольных субстратах с ворсистой поверхностью отмечается повышенная средняя плотность постличинок мидии на 3–5 крайних ни-

тях нижней и верхней частей. Величина этого превышения, по сравнению со средней частью, может быть семикратной. Это может свидетельствовать об активном вертикальном перемещении мидий или неравномерной их выживаемости на поверхности субстрата.

2. Обнаруженный краевой эффект следует учитывать при выборочном подсчете численности постличинок на субстрате.

3. Чтобы уменьшить возможное влияние смертности постличинок на контрольном субстрате или их миграции с соседних поверхностей и наоборот, необходимо сократить сроки экспозиции, например, до 20 суток.

4. У южных и юго-западных берегов Крыма вторичное оседание мидий на ворсистые субстраты в течение 1-2 месяцев их экспозиции в море маловероятно и его численный вклад в совокупность постличинок на контрольных субстратах незначителен.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «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» (№ 0012-2019-0007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Caceres-Martinez J., Robledo J.A.F., Figueras A.* Settlement and post-larvae behaviour of *Mytilus galloprovincialis*: field and laboratory experiments // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1994. Vol. 112. P. 107–117.

2. *Trevelyan G.A., Chang E.S.* Light-induced shell pigmentation in post-larval *Mytilus edulis* and its use as a biological tag // Mar. Ecol. Progr. Ser. 1987. Vol. 39, № 2. P. 137–144.

3. *Petraitis P.S, Dudgeon S.R.* Declines over the last two decades of five intertidal invertebrate species in the western North Atlantic // Communications Biology. 2020. Vol. 3. Article number 591.

4. *Westerbom M., Kraufvelin P., Mustonen O. et al.* Explaining recruitment stochasticity at a species' range margin // Frontiers in Marine Science. 2021. Vol. 8 (1). Article 659556.

5. *Казанкова И.И.* Определение потенциальной пополняемости поселений мидии, митилястера и анадары в прибрежных акваториях Черного и Адриатического морей с помощью экспериментальных субстратов // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 3 (37). С. 112–119.

6. *Казанкова И.И.* Влияние повышения температуры поверхностного слоя моря на потенциальную пополняемость популяции мидии у берегов юго-западного Крыма // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 3 (41). С. 133–138.

7. *Казанкова И.И., Клименко А.В.* Контроль потенциальной пополняемости мидии с учетом некоторых параметров среды в эстуарной зоне Севастополя // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 4 (46). С. 45–54.

8. *Долгопольская М.А.* Экспериментальное изучение процесса обрастания в море // Тр. Севаст. биол. станции. 1954. Т. 8. С. 155–173.

9. *Никитин В.Н., Турпаева Е.П.* Процессы обрастания в Черном море. Оседание личинок в районе Геленджика // Доклады АН СССР. 1958. Т. 121. № 2. С. 172–174.

10. *Hrs-Brenko M.* The study of mussel larvae and their settlement in Vela Draga Bay (Pula, the northern Adriatic Sea) // Aquaculture. 1973. Vol. 2. P. 173–182.

11. *Dobretsov S., Miron G.* Larval and post-larval vertical distribution of the mussel *Mytilus edulis* in the White Sea // Marine Ecology Progress Series. 2001. № 218. P. 179–187.

12. *Montes A., Vázquez E., Peteiro L.G. et al.* Dynamics and processes influencing recruitment of the invasive mussel *Xenostrobus securis* and the coexisting indigenous *Mytilus galloprovincialis* in northwestern Spain // Aquatic Invasions. 2021. Vol. 16. № 3. P. 391–414.

13. *Казанкова И.И., Щуров С.В.* Способ изучения пополняемости поселений

мидии, митилястера и анадары в прибрежной зоне Черного моря: патент 2548105 РФ. МПК A01K 61/00№2014150175/93 / патентообладатель ФГБУН «Институт морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского РАН». Опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10.

14. *Reaugh-Flower K.E., Branch G., Harris J.M. et al.* Patterns of mussel recruitment in southern Africa: a caution about using artificial substrata to approximate natural recruitment // Marine Biology. 2010. Vol. 157. № 10. P. 2177–2185.

15. *McCulloch A., Shanks A.L.* Topographically generated fronts, very nearshore oceanography and the distribution and settlement of mussel larvae and barnacle cyprids // Journal of Plankton Research, 2003. Vol. 25. № 11. P. 1427–1439.

16. *Menge B.A., Chan F., Nielsen K.J. et al.* Climatic variation alters supply-side ecology: impact of climate patterns on phytoplankton and mussel recruitment // Ecological Monographs. 2009. Vol. 79. № 3. P. 379–395.

17. *Smith J.R., Fong P., Ambrose R.F.* Spatial patterns in recruitment and growth of the mussel *Mytilus californianus* (Conrad) in southern and northern California, USA, two regions with differing oceanographic conditions // Journal of Sea Research. 2009. Vol. 61. № 3. P. 165–173.

18. *Folino-Rorem N.C., Stoeckel J., Thorn E. et al.* Effects of artificial filamentous substrate on zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) settlement // Biological Invasions. 2006. Vol. 8(1). P. 89–96.

19. *Bayne B.L.* Growth and the delay of metamorphosis of the larvae of *Mytilus edulis* (L.) // Ophelia. 1965. Vol. 2. № 1. P. 1–47.

20. *Eyster L.S., Pechenik J.A.* Attachment of *Mytilus edulis* L. larvae on algal and byssal filaments is enhanced by water agitation // J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 1987. Vol. 114. № 2/3. P. 99–110.

21. *Казанкова И.И.* Поведенческие реакции оседающих педивелигеров *Mytilus galloprovincialis* Lam. при различных режимах движения воды // Системы контроля окружающей среды. 2016. № 3 (23). С. 119–124.

22. *Bayne B.L.* Primary and secondary settlement in *Mytilus edulis* L. (Mollusca) // Journal of Animal Ecology 1964. Vol. 33. № 3. P. 513–523.

23. *Bayne B.L.* The biology of mussel larvae / In: Bayne B.L. (ed) Marine mussels: their ecology and physiology. Cambridge University Press. Cambridge, 1976. P. 81–120.

24. *Kazankova I.I.* Peculiarities of seasonal dynamics of *Mytilus galloprovincialis* larvae numbers in the coastal zone of the Crimea (based on long term data) // Hydrobiological Journal. 2014. Vol. 50. № 3. С. 13–20.

25. *Славина О.Я.* Рост мидий в Севастопольской бухте // Бентос. Киев: Наук. думка, 1965. С. 24–29.

FEATURES OF DISTRIBUTION AND SIZE COMPOSITION OF POST-LARVAE OF MUSSELS *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* ON CONTROL SUBSTRATES IN COASTAL WATERS OF THE SOUTHERN AND SOUTH-WESTERN CRIMEA

I.I. Kazankova

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

The size composition and spatial distribution of mussel post-larvae were studied on control substrates with a hairy surface used in monitoring the potential mussel recruitment of the Black Sea population of *Mytilus galloprovincialis* off the coast of Crimea in the layer of water 3–15 m. An increased average density of "planting" of mussel post-larvae on the 4–8 outermost threads of the lower and upper parts of the substrate was recorded. In some cases, the excess over the density of post-larvae in the middle part was sevenfold. It was determined that mass secondary settling on control substrates of mussel post-larvae (with shell length over 2.0 mm) was not characteristic for the studied areas.

Keywords: mussel, larvae, post-larvae, recruitment rate, vertical migration, edge effect, secondary settling

REFERENCES

1. *Caceres-Martinez J., Robledo J.A.F., and Figueras A.* Settlement and post-larvae behaviour of *Mytilus galloprovincialis*: field and laboratory experiments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1994, Vol. 112, pp. 107–117.

2. *Trevelyan G.A. and Chang E.S.* Light-induced shell pigmentation in post-larval *Mytilus edulis* and its use as a biological tag. *Mar. Ecol. Progr. Ser.,* 1987, Vol. 39, No. 2, pp. 137–144.

3. *Petraitis P.S. and Dudgeon S.R.* Declines over the last two decades of five intertidal invertebrate species in the western North Atlantic. *Communications Biology*, 2020, Vol. 3, Article 591.

4. *Westerbom M*., *Kraufvelin P.*, *Mustonen O., and Díaz E*. Explaining recruitment stochasticity at a species' range margin. *Frontiers in Marine Science,* 2021, Vol. 8 (1), Article 659556.

5. *Kazankova I.I.* Opredelenie potenczial`noj popolnyaemosti poselenij midii, mitilyastera i anadary v pribrezhnykh akvatoriyakh Chernogo i Adriaticheskogo morej s pomoshh`yu eksperimentalnykh substratov (Measuring the potential recruitment of mussel, mytilaster and anadara settlement in the coastal waters of the Black and Adriatic seas by experimental substrates). *Sistemy kontrolya okruzhayushhej sredy,* 2019, No. 3 (37), pp. 112–119.

6. *Kazankova I.I.* Vliyanie povysheniya temperatury` poverkhnostnogo sloya morya na potenczial`nuyu popolnyaemost` populyaczii midii u beregov yugo-zapadnogo Kryma (The effect of elevated temperature of the sea surface on the mussel recruinment off the coast of the southwestern Crimea). *Sistemy kontrolya okruzhayushhej sredy*, 2020, No. 3 (41), pp. 133–138.

7. *Kazankova I.I. and Klimenko A.V.* Kontrol potenczialnoj popolnyaemosti midii s uchetom nekotorykh parametrov sredy v estuarnoj zone Sevastopolya (Control of potential mussel recruitment taking into account some parameters in Sevastopol estuarine zone). *Sistemy kontrolya okruzhayushhej sredy*, 2021, No. 4 (46), pp. 45–54.

8. *Dolgopol`skaya M.A*. Eksperimentalnoe izuchenie proczessa obrastaniya v more (Experimental study of the settlement process in the sea). *Tr. Sevast. biol. stanczii,* 1954, Vol. 8, pp. 155–173.

9. *Nikitin V.N. and Turpaeva E.P.* Proczessy obrastaniya v Chernom more. Osedanie lichinok v rajone Gelendzhika (Settling processes in the Black Sea. Settling of larvae in the Gelendzhik region). *Doklady AN SSSR*, 1958, Vol. 121, No. 2, pp. 172–174.

10. *Hrs-Brenko M.* The study of mussel larvae and their settlement in Vela Draga Bay (Pula, the northern Adriatic Sea). *Aquaculture*, 1973, Vol. 2, pp. 173–182.

11. *Dobretsov S. and Miron G.* Larval and post-larval vertical distribution of the mussel *Mytilus edulis* in the White Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, No. 218, pp. 179–187.

12.*Montes A., Vázquez E., Peteiro L.G., and Olabarrial C.* Dynamics and processes influencing recruitment of the invasive mussel *Xenostrobus securis* and the coexisting indigenous *Mytilus galloprovincialis* in north-western Spain. *Aquatic Invasions*, 2021, Vol. 16, No. 3, pp. 391–414.

13. *Kazankova I.I. and Shchurov S.V.* Sposob izucheniya popolnyaemosti poselenij midii, mitilyastera i anadary v pribrezhnoj zone Chernogo morya (A method for studying the recruitment of mussel, mitilyaster and anadara settlements in the coastal zone of the Black Sea). Patent 2548105 RF. MPK A01K 61/00#2014150175/93 / patentoobladatel` FGBUN «Institut morskikh biologicheskikh issledovanij imeni A.O. Kovalevskogo RAN» / Opubl. 10.04.2015, Byul. No. 10.

14. *Reaugh-Flower K.E., Branch G., Harris J.M*., *McQuaid C.D., Currie B., Dye A., and Robertson B.* Patterns of mussel recruitment in southern Africa: a caution about using artificial substrata to approximate natural recruitment. *Marine Biology,* 2010, Vol. 157, No. 10, pp. 2177–2185.

15. *McCulloch A. and Shanks A.L.* Topographically generated fronts, very nearshore oceanography and the distribution and settlement of mussel larvae and barnacle cyprids. *Journal of Plankton Research*, 2003, Vol. 25, No. 11, pp. 1427–1439.

16. *Menge B.A., Chan F., Nielsen K.J. Lorenzo E.D., and Lubchenco J.* Climatic variation alters supply-side ecology: impact of climate patterns on phytoplankton and mussel recruitment. *Ecological Monographs*, 2009, Vol. 79, No. 3, pp. 379–395.

17. *Smith J.R., Fong P., and Ambrose R.F.* Spatial patterns in recruitment and growth of the mussel *Mytilus californianus* (Conrad) in southern and northern California, USA, two regions with differing oceanographic conditions. *Journal of Sea Research,* 2009, Vol. 61, No. 3, pp. 165–173.

18. *Folino-Rorem N.C., Stoeckel J., Thorn E., and Page L.* Effects of artificial filamentous substrate on Zebra Mussel (*Dreissena polymorpha*) settlement. *Biological Invasions,* 2006, Vol. 8, pp. 89–96.

19. *Bayne B.L.* Growth and the delay of metamorphosis of the larvae of *Mytilus edulis* (L.). *Ophelia*, 1965, Vol. 2, No. 1, pp. 1–47.

20. *Eyster L.S. and Pechenik J.A.* Attachment of *Mytilus edulis* L. larvae on algal and byssal filaments is enhanced by water agitation. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.,* 1987, Vol. 114, No. 2/3, pp. 99–110.

21. *Kazankova I.I.* Povedencheskie reakczii osedayushhikh pediveligerov *Mytilus galloprovincialis* Lam. pri razlichny`kh rezhimakh dvizheniya vody` (Behavioral response of settling pediveligers *Mytilus galloprovincialis* Lam. in differernt modes water movements). *Sistemy` kontrolya okruzhayushhej sredy*, 2016, No. 3 (23), pp. 119–124.

22.*Bayne B.L.* Primary and secondary settlement in *Mytilus edulis* L. (Mollusca). *Journal of Animal Ecology*, 1964, Vol. 33, No. 3, pp. 513–523.

23. *Bayne B.L.* The biology of mussel larvae. In: Bayne B.L., Ed., Marine mussels: their ecology and physiology, Cambridge University Press, Cambridge, 1976, pp. 81–120.

24. *Kazankova I.I.* Peculiarities of seasonal dynamics of *Mytilus galloprovincialis* larvae numbers in the coastal zone of the Crimea (based on long term data). *Hydrobiological Journal,* 2014, Vol. 50, No. 3, pp. 13–20.

25. *Slavina O.Ya.* Rost midij v Sevastopol`skoj bukhte (Growth of mussels in the Sevastopol Bay). Bentos. Kiev: Nauk. dumka, 1965, pp. 24–29.

УДК 577.35. 578.4. 57.08. (262.5) DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-37-43

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МОРСКУЮ МИКРОБИОТУ

М.Н. Пеньков[1], С.А. Шоларь[1,2], О.А. Степанова[1]

[1]Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail:solar-ua@ya.ru
[2]ФИЦ Морской гидрофизический институт РАН, РФ, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: sa.sholar@mail.ru

Разработана и создана лабораторная установка для изучения влияния переменного электромагнитного поля на некоторые характеристики морской микробиоты (суспензии альговирусов, культуры микроводорослей). Установка позволяет изучать влияние электромагнитного воздействия в частотном диапазоне 25–150 Гц и генерировать переменное магнитное поле 0,1–0,545 Гс длительностью до нескольких суток.
Ключевые слова: лабораторная установка, электромагнитное поле, электромагнитное влияние на микробиоту, частота и мощность.

Поступила в редакцию: 17.06.2022. После доработки: 28.07.2022.

Введение. Исследователями было показано [1], что изучение влияния электромагнитных полей (ЭМП) и излучений на биологические объекты позволяет получать важные научные данные, которые могут быть применены на практике:

– в экологии для разработки предельно допустимых уровней ЭМП для человека и других биообъектов;

– в медицине при разработке новых способов диагностики и методов физиотерапевтического лечения болезней;

– в биотехнологии как один из способов регулирования биохимических показателей различных микробных культур.

При этом в обзоре информации по механизмам влияния ЭМП на живые объекты [1] описано не менее 8 гипотез. В работах проанализированы вероятные повреждающие факторы влияния магнитных (МП) и ЭМП на биологические объекты, в т.ч. и на вирусы, а также указана и необходимость продолжения исследований в этом направлении [2–9].

Особо интересным с нашей точки зрение является сообщение [6], в котором рассмотрены результаты ряда экспериментальных работ с использованием напряженности магнитного поля значительно ниже окружающего магнитного поля Земли (в том числе с интенсивностями, близкими к нулю), и при этом были обнаружены неожиданные эффекты.

Для исследования влияния МП и ЭМП исследователями создавались специальные установки [10–13]. В описываемых устройствах были предусмотрены возможность тепло отведения и регуляции температуры [11], управление напряженностью МП [12] и некоторые другие приспособления для улучшения проведения экспериментов и приближения их к оптимальным условиям соответствия природной среде. В опубликованных работах отмечены положительные эффекты от воздействия МП и ЭМП на микроводоросли, например, на *Scenedesmus, Chlorella vulgaris* [10, 13]. Однако в представленных и описанных установках отсутствуют отсеки для размещения контрольных проб в условиях, идентичных опытным, с исключением воздействия ЭМП.

Таким образом, в опубликованной литературе и среди патентов присутствует описание использованных сложных установок для создания ЭМП в целях изучения его влияния на биологические объекты. Однако в этих устройствах часто не учитывается необходимость наличия контроля.

В наших более ранних исследованиях подробно описана простая лабораторная установка по изучению влияния постоянного магнитного поля на изменение инфекционного титра различных штаммов разных видов черноморских альговирусов и на чувствительность культур микроводорослей к вирусному лизису [14–16].

Целью выполненной работы, представляемой в настоящем сообщении, явились разработка, создание и апробирование на практике простой лабораторной установки для изучения влияния переменного электромагнитного поля на морскую микробиоту (суспензии альговирусов и жидкие культуры микроводорослей) по сравнению с результатами в контроле.

Материалы и методы. В качестве исследуемой морской микробиоты использовали культуры микроводорослей *Tetraselmis viridis* и *Dunaliella viridis*, а также штаммы альговирусов из авторской коллекции альговирусов к этим микроводорослям в виде вирусных суспензий в разных инфекционных титрах.

Жидкие альгологически чистые культуры микроводорослей были получены в 2020–2021 гг. из коллекции живых культур микроводорослей отдела экологической физиологии водорослей ФИЦ “ИнБЮМ А.О. Ковалевского РАН”. Культуры микроводорослей поддерживались в стабилизирующей среде Гольдберга в лабораторных условиях на базе Института природно-технических систем.

Инфекционный титр и его изменение используемых в экспериментах по влиянию ЭМП штаммов альговирусов определяли путем титрования контрольных и опытных (воздействие ЭМП) образцов по запатентованной авторской методике [17]. Изменения чувствительности к вирусному лизису индикаторных (сенситивных) культур микроводорослей в контроле (без воздействия ЭМП) и в опыте (с воздействием ЭМП) также определяли с использованием запатентованного авторского способа [17], что подробно описано в ранее опубликованных работах [14–16].

Исследования влияния переменного ЭМП на некоторые характеристики морской микробиоты в соответствии с поставленной целью проводили в разработанной лабораторной установке, созданной на базе лаборатории гидрофизических и биоэлектронных измерительных систем и технологий Института природно-технических систем. Краткое описание этого устройства было опубликовано ранее и обсуждено на одной из научных конференций [18].

Результаты и обсуждение. Созданная лабораторная установка позволяет изучать влияние электромагнитного воздействия в частотном диапазоне 25–150 Гц и уровнем входного сигнала 24–100 мВ с максимальной длительностью от 24 ч и до нескольких суток.

В установке помимо встроенного генератора, позволяющего регулировать частотный диапазон по желанию исследователей, при необходимости имеется возможность подключать внешний источник генерации в более широком диапазоне. Встроенный усилитель позволяет регулировать величину воздействия ЭМП на лабораторные емкости (стеклянную лабораторную посуду в виде пробирок, химических стаканов, колб и пр.) с исследуемыми биологическими образцами, помещаемые внутрь соленоида (катушки).

Плавность регулировки поля достигается за счет эффекта резонанса контура соленоид–емкость при помощи использования переменной емкости. Величина поля определяется через измерение напряжения на контуре, а дополнительные отводы контура и подключение дополнительных конденсаторов позволяют расширить частотный диапазон измерений.

Время для экспозиции определяется экспериментатором и измеряется хронометром или секундомером, а также обычными часами, т.к. длительность проводимых экспериментов обычно была не менее суток.

Окончательная обработка полученных результатов проводится по описанным ранее способам [14–16], т.е. приня-

тым в биологии, в частности в вирусологии, методам.

Первоначальные исследуемые образцы, помещаемые в ЭМП, имеют определенные биологические параметры – чувствительность к вирусному лизису для культур микроводорослей и значения инфекционного титра (в IE/ml) для вирусных суспензий. Величины этих параметров определяются заранее перед экспериментами, а также в ходе экспериментов и в их конце.

Лабораторная установка, в зависимости от используемого соленоида (соленоид № 1 или № 2), может быть представлена в 2-х вариантах. На рис. 1 отражена фотосхема лабораторной установки первого варианта с использованием соленоида № 1 (позиция 5 на рис. 1), имеющего следующие характеристики:

- длина L = 180 мм;
- количество витков N = 230;
- внешний диаметр D = 20 мм;
- сопротивление R = 2,9 Ом;

В качестве источника освещения (позиция 6 на рис. 1) используется лампа накаливания 75W E27, подключенная в городскую сеть напряжения (220 В / 50 Гц). В дальнейшем планируется заменить источник освещения на светодиодную фитолампу.

В первом варианте используемой лабораторной установки минимальное расстояние от источника освещения до пробы, представляемой как контролем, так и опытом), l = 200 мм.

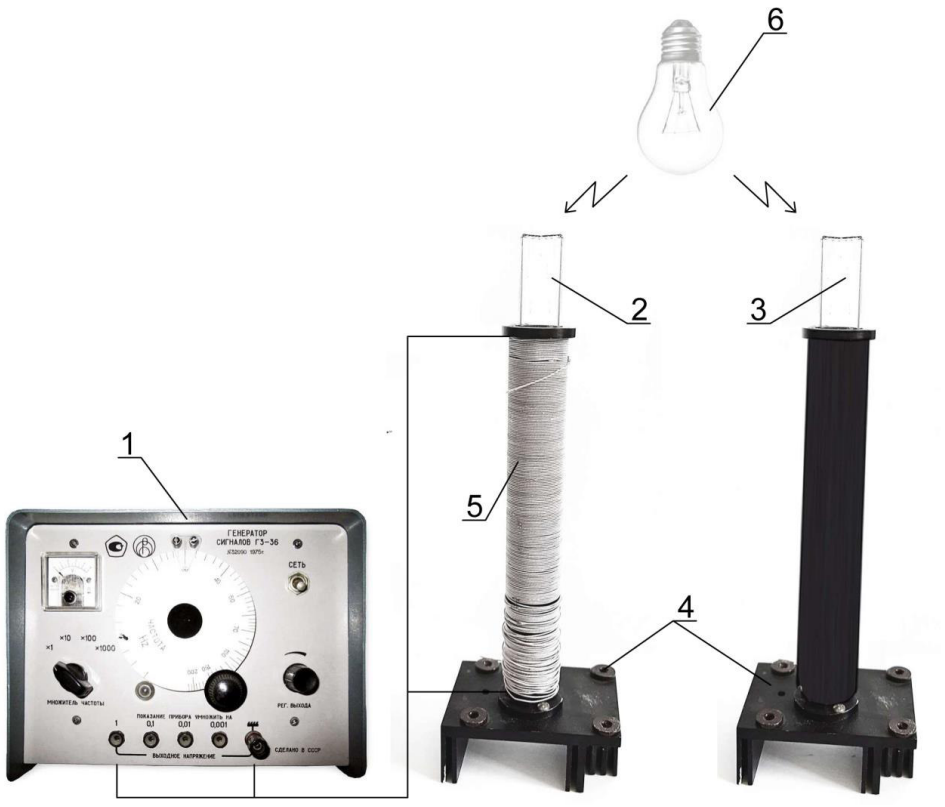


Рис. 1. Схематическое изображение установки для изучения влияния переменного электромагнитного поля на морскую микробиоту, где 1 – генератор низких частот, 2 – образец микробиоты (проба) в опыте, 3 – образец микробиоты (проба) в контроле, 4 – корпус держателя проб, 5 – однослойная обмотка соленоида, 6 – искусственный источник освещения

Fig. 1. Schematic representation of the installation for studying the influence of a variable electromagnetic field on the marine microbiota, where 1 is a low frequency generator, 2 – microbiota sample in the experiment, 3 – microbiota sample in the control, 4 – sample holder body (coil), 5 – single-layer solenoid winding, 6 – artificial light source

Для оценки магнитной индукции (*B*, Гс) соленоидов были проведены расчеты с использованием онлайн калькулятора [19]. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчетов магнитной индукции соленоидов

Соленоид	U, мв	B, Гс
№ 1	25	0,128
	100	0,545
№ 2	25	0,100
	100	0,110

Результаты расчетов были сопоставлены с измеренными значениями. Измерения проводили при помощи датчика электромагнитного поля (аналоговый датчик Холла) на базе чувствительного элемента SS495A1, который входит в лабораторный стенд «Среда» [20]. Результаты расчетов и измерений на полюсах соленоидов показали близкие значения. Первый вариант исполнения обладает рядом недостатков: нет возможности разместить несколько проб в корпусе держателя, а также из-за малого внутреннего диаметра корпуса в пробы проникает недостаточно света. Поэтому большую часть экспериментов проводили во втором варианте исполнения (соленоид № 2).

Соленоид № 2 имеет следующие характеристики:

- длина L = 50 мм;
- количество витков N=50;
- внешний диаметр D = 50 мм;
- сопротивление R = 3,1 Ом;
- l = 250 мм.

Применение второго варианта изготовления дало возможность одновременно изучать в ЭМП две или три пробирки с биологическими образцами (разные вирусные суспензии), либо исследовать до 20–30 мл жидкой морской микробиоты (жидкие культуры микроводорослей) в колбах или химических стаканах соответствующих объемов (емкостью до 50 мл).

Поскольку созданная лабораторная установка позволяет изучать влияние электромагнитного воздействия в частотном диапазоне 25–150 Гц и уровнем сигнала 24–100 мВ, исследования проводили с двумя различными характеристиками – минимальными с частотой 25 Гц и уровнем сигнала 24 мВ (B = 0,1 Гс) и максимальными с частотой 150 Гц и уровнем сигнала 100 мВ (B = 0,11 Гс).

Длительность пребывания используемых в проведенных экспериментах биологических образцов под воздействием ЭМП также варьировала от 24 ч и до нескольких суток (максимум 6 суток).

Полученные в ходе проведенных исследований данные свидетельствуют, что как альговирусы, так и их хозяева – микроводоросли реагировали на воздействия ЭМП как с максимальными, так и с минимальными его характеристиками. При этом снижение инфекционного титра альговирусов и повышение устойчивости к вирусному лизису у культур микроводорослей на 1–3 порядка зависело от продолжительности пребывания в ЭМП.

Заключение. Описана разработанная простая по устройству и эксплуатации лабораторная установка для изучения влияния переменного электромагнитного поля на некоторые характеристики морской микробиоты (суспензии альговирусов, культуры микроводорослей).

Созданная установка позволила изучать влияние электромагнитного воздействия в частотном диапазоне 25–150 Гц и уровнем сигнала 24–100 мВ длительностью от 24 ч и до нескольких суток. В зависимости от используемого соленоида лабораторная установка способна генерировать магнитное поле со значением B = 0,1–0,545 Гс.

По предварительным данным было установлено, что пребывание в ЭМП биологических проб морской микробиоты приводит к изменениям их некоторых биологических характеристик (инфекционный титр альговирусов, чувствительность к вирусной инфекции) на порядки.

Дальнейшие исследования в этом направлении будут продолжены.

Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС № 0012-2021-0010 (№ госрегистрации 121122300070-9) НИР "Разработка новых средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод" и госбюджетной темы ФИЦ МГИ РАН № 0555-2021-0003 «Оперативная океанология».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шашурин. М.М.* Эффекты действия техногенных электромагнитных излучений и полей на живые организмы (обзор) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2015. С. 83–89.

2. *Взаимодействие* живой системы с электромагнитным полем / Р.Р. Асланян, С.В. Тульский, А.В. Григорян [и др.] // Вест. Моск. Ун-та. Сер. 16. Биология. 2009. № 4. С. 20–23.

3. *Влияние* электромагнитных полей в диапазонах сверхдлинных волн на рост микроорганизмов и репродукцию вирусов / Б.Р. Богомольный, В.П. Барзинский, Т.Л. Гридина [и др.] // Проблеми інноваційно-інвестиційного розвитку. 2014. № 6. С. 165–177.

4. *Евстропов В.М., Кочеткова Д.М., Столярова О.Ю.* Электромагнитное поле и биообъекты: исследовательские подходы // Modern science. 2019. № 12 (2). С. 30–32.

5. *Каплуненко В.Г., Косинов Н.В., Скальный А.В.* Уязвимые электрически заряженные места Sars-Cov-2; электрическая модель вируса и роль микроэлементов в его инактивации // Микроэлементы в медицине. 2021. Т. 22 (1). С. 3–20.

6. *Краткий обзор* современного состояния исследований биологического действия слабых магнитных полей / И.А. Шаев., В.В. Новиков., Е.В. Яблокова [и др.] // Биофизика. 2022. Т. 67. № 2, С. 319–326

7. *Новиков В.В.* Биологические эффекты слабых и сверхслабых магнитных полей: Дисс. … д-ра биол. наук (спец. 03.00.02) М.: ИБК РАН, 2005. 201 с.

8. *Пономарев В.О.* Модель механизма воздействия слабых электромагнитных полей на биологические и физико-химические системы: Дисс. … канд. физ.-мат. наук (спец. 03.00.02) М.: ИБК РАН, 2009. 86 с.

9. *Пономарев В.О., Новиков В.В.* Действие низкочастотных переменных магнитных полей на скорость биохимических реакций, приводящих к образованию активных форм кислорода // Биофизика. 2009. Т. 54. № 2. С. 235–241.

10. *Воздействие* переменного низкочастотного магнитного поля на рост одноклеточной водоросли *Scenedesmus* / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Рзянина [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 3. С. 39–43.

11. *Устройство* для воздействия магнитным полем на биообъекты: патент на полезную модель 70138 / Д.А. Усанов, С.Г. Сучков, А.А. Сергеев [и др.] / Россия. Заявл. 08.10.2007; опубл. 20.01.2008, Бюл. № 2. 12 с.

12. *Устройство* для исследования биологических жидкостей в переменном магнитном поле: патент 163735 / Е.Е. Текуцкая, М.Г. Барышев., Г.П. Ильченко [и др.] / Россия. Заявл. 15.02.2016; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22. 20 с.

13. *Effects* of Magnetic Field on the Antioxidant Defense System of Recirculation-Cultured *Chlorella vulgaris* / Hai-Ying Wang, Xiao-Bo Zeng, Si-Yuan Guo [et al.] // Bioelectromagnetics. 2008. Vol. 29. N 1. P. 39–46.

14. *Степанова О.А., Гайский П.В., Шоларь С.А.* Изменение инфекционного титра черноморского альговируса микроводоросли *Tetraselmis viridis* под влиянием постоянного магнитного поля // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 4 (42). С. 171–179.

15. *Степанова О.А., Гайский П.В., Шоларь С.А.* Селективная чувствительность черноморских микроводорослей к вирусной инфекции после воздействия постоянного магнитного поля // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 3 (45). С. 31–39.

16. *Stepanova O.A., Gaisky P.V., Sholar S.A.* Influence of a constant magnetic field on the infectious titer of the Black Sea algal viruses // Biophysics. 2022. Vol. 67. N 2. P. 183–187.

17. *Степанова О.А.* Способ изоляции альговирусов одноклеточных водорослей, например *Platymonas viridis* Rouch (Chlorophita) // Патент Украины № 65864. 2004. Бюл. № 4.

18. *Пеньков М.Н.* Лабораторная установка для изучения влияния переменного электромагнитного поля на морскую микробиоту / Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Системы контроля окружающей среды–2021». Севастополь, 09–12 ноября 2021 г. Севастополь: ИПТС, 2021. С. 32.

19. Калькулятор магнитной индукции соленоида. - URL: https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/solenoid-magnetic-field/ (Дата обращения 10.06.22)

20. *Гайский П.В.* Модернизация электронного блока лабораторного стенда «Среда» // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 4 (38). С. 5–10.

LABORATORY FACILITY (SETUP) FOR STUDYING THE INFLUENCE OF AN ALTERNATING ELECTROMAGNETIC FIELD ON MARINE MICROBIOTA

M.N. Penkov[1], S.A. Sholar[1,2], O.A. Stepanova[1]

[1]Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28
[2]FRC Marine Hydrophysical Institute of RAS, RF, Sevastopol, Kapitanskaya St., 2

A laboratory facility (setup) for studying the influence of an alternating electromagnetic field on some characteristics of the marine microbiota (suspensions of algal viruses, cultures of microalgae). The setup makes it possible to study the effect of electromagnetic exposure in the frequency range of 25–150 Hz and generating an alternating magnetic field of 0.1–0.545 G lasting up to several days.
Keywords: laboratory facility (setup), electromagnetic field, electromagnetic influence on microbiota, frequency, and power.

REFERENCES

1. *Shashurin M.M.* Effekty dejstviya tekhnogennyh elektromagnitnyh izluchenij i polej na zhivye organizmy (obzor) (Effects of technogenic electromagnetic radiation and fields on living organisms (review)). *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*, 2015, pp. 83–89.

2. *Aslanyan R.R., Tulsky S.V., Grigoryan A.V., and Babusenko E.S.* Interaction of a living system with an electromagnetic field, *Moscow University Biological Sciences Bulletin,* Vol. 64, No. 4, pp. 153–156.

3. *Bogomol'nyj B.R., Barzinskij V.P., Gridina T.L., Fedchuk A.S., and Mudrik L.M.* Vliyanie elektromagnitnyh polej v diapazonah sverhdlinnyh voln na rost mikroorganizmov i reprodukciyu virusov (Influence of electromagnetic fields in the ranges of superlong waves on the growth of microorganisms and the reproduction of viruses). *Problemi innovacijno-investicijnogo rozvitku*, 2014, No. 6, pp. 165–177.

4. *Evstropov V.M., Kochetkova D.M., and Stolyarova O.Yu*. Elektromagnitnoe pole i bioob"ekty: issledovatel'skie podhody (Electromagnetic field and bioobjects: research approaches). *Modern science*, 2019, No. 12 (2), pp. 30–32.

5. *Kaplunenko V.G., Kosinov N.V., and Skal'nyj A.V.* Uyazvimye elektricheski zaryazhennye mesta Sars-Cov-2; elektricheskaya model' virusa i rol' mikroelementov v ego inaktivacii (Vulnerable electrically charged places Sars-Cov-2; electrical model of the virus and the role of trace elements in its inactivation). *Mikroelementy v medicine,* 2021, Vol. 22 (1), pp. 3–20.

6. *Shaev I.A., Novikov V.V., YAblokova E.V., and Fesenko E.E.* Kratkij obzor sovremennogo sostoyaniya issledovanij biologicheskogo dejstviya slabyh magnitnyh polej (Brief review of the current state of research on the biological effects of weak magnetic fields). *Biofizika*, 2022, Vol. 67, No. 2, pp. 319–326.

7. *Novikov V.V.* Biologicheskie effekty slabyh i sverhslabyh magnitnyh polej: Diss. d-ra biol. nauk (Biological effects of weak and superweak magnetic fields. Dr. biol. sci. thesis), Moscow: ICB RAS, 2005, 201 p.

8. *Ponomarev V.O*. Model' mekhanizma vozdejstviya slabyh elektromagnitnyh polej na biologicheskie i fiziko-himicheskie sistemy. Avtoref. Diss kand. fiz.-mat. nauk (Model of the mechanism of action of

weak electromagnetic fields on biological and physico-chemical systems. Cand. phys.-math. sci. thesis), Moscow: ICB RAS, 2009, 86 p.

9. *Ponomarev V.O. and Novikov V.V.* Dejstvie nizkochastotnyh peremennyh magnitnyh polej na skorost' biohimicheskih reakcij, privodyashchih k obrazovaniyu aktivnyh form kisloroda (The effect of low-frequency alternating magnetic fields on the rate of biochemical reactions leading to the formation of reactive oxygen species). *Biofizika*, 2009, Vol. 54, No. 2, pp. 235–241.

10. *Usanov D.A., Skripal' A.V., Rzyanina A.V., and Usanov A.D.* Vozdejstvie peremennogo nizkochastotnogo magnitnogo polya na rost odnokletochnoj vodorosli *Scenedesmus* (Effect of an alternating low-frequency magnetic field on the growth of the unicellular algae *Scenedesmus*). *Biomedicinskaya radioelektronika,* 2009, No. 3, pp. 39–43.

11. *Usanov D.A., Suchkov S.G., and Sergeev A.A.* Ustrojstvo dlya vozdejstviya magnitnym polem na bioob"ekty (Device for influncing biological objects with a magnetic field): pat. 70138, Ros. Federaciya. Zayavl. 08.10.2007; opubl. 20.01.2008. Byul., No. 2, 12 p.

12. *Tekuckaya E.E., Baryshev M.G., Il'chenko G.P., and Lomakina L.V.* Ustrojstvo dlya issledovaniya biologicheskih zhidkostej v peremennom magnitnom pole (Device for the study of biological fluids in an alternating magnetic field): pat. 163735, Ros. Federaciya. Zayavl. 15.02.2016; opubl. 10.08.2016, Byul., No. 22, 20 p.

13. *Wang H.Y., Zeng X.B., Guo S.Y., and Li Z. T.* Effects of Magnetic Field on the Antioxidant Defense System of Recirculation-Cultured Chlorella vulgaris. *Bioelectromagnetics*, 2008, Vol. 29, No. 1, pp. 39–46.

14. *Stepanova O.A., Gajskij P.V., and Sholar S.A.* Izmenenie infekcionnogo titra chernomorskogo al'govirusa mikrovodorosli *Tetraselmis viridis* pod vliyaniem postoyannogo magnitnogo polya (Changes in the infectious titer of the Black Sea algal virus of microalgae *Tetraselmis viridis* under the influence of a constant magnetic field). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2020, No. 4 (42), pp. 171–179.

15. *Stepanova O.A., Gajskij P.V., and Sholar S.A.* Selektivnaya chuvstvitel'nost' chernomorskih mikrovodoroslej k virusnoj infekcii posle vozdejstviya postoyannogo magnitnogo polya (Selective sensitivity of Black Sea microalgae to viral infection after exposure to a constant magnetic field). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2021, No. 3 (45), pp. 31–39.

16. *Stepanova O.A., Gaisky P.V., and Sholar S.A.* Influence of a constant magnetic field on the infectious titer of the Black Sea algal viruses, *Biophysics*, 2022, Vol. 67, No. 2. pp. 183–187.

17. *Stepanova O.A.* Sposob izolyacii al'govirusov odnokletochnyh vodoroslej, naprimer *Platymonas viridis* Rouch (Chlorophita) (Method for isolating algal viruses of unicellular algae, for example *Platymonas viridis* Rouch (Chlorophita)); pat. 65864, Ukraine, 2004, Byul. No. 4.

18. *Pen'kov M.N.* Laboratornaya ustanovka dlya izucheniya vliyaniya peremennogo elektromagnitnogo polya na morskuyu mikrobiotu (Laboratory facility for studying the influence of variable electromagnetic field on marine microbiota), Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy–2021 (Environmental Control Systems–2021), International Conference, Sevastopol: IPTS, 2021, p. 32.

19. https://www.translatorscafe.com/unit-converter/ru-RU/calculator/solenoid-magnetic-field (June 10, 2022).

20. *Gaisky P.V.* Modernizacija jelek-tronnogo bloka laboratornogo stenda “Sreda” (Modernization of the block of the electronic laboratory stand “Environment”), *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2019, No. 4 (38), pp. 5–10.

УДК 504.3.054 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-44-50

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВОЗМОЖНОГО НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ ОБСТАНОВКУ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИЗ ЕВРОПЫ

А.А. Егоркин

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: egorkin1974@yandex.ru

Представлены методологические подходы к оценке возможного негативного воздействия источников выбросов из Европы, содержащих взвешенные частицы, на экологическую обстановку Крыма. Методология исследования основана на совместном использовании траекторной модели переноса и анализа данных спутниковых наблюдений. Для анализа был взят случай превышения предельно-допустимой концентрации взвешенных частиц, зарегистрированный на посту наблюдения в Крыму. Исследованы пятидневные обратные траектории, заканчивающиеся в пункте наблюдения. Проведен анализ данных спутниковых наблюдений за движением аэрозоля над исследуемой территорией. Определены основные типы аэрозолей с помощью алгоритма CALIPSO.
Ключевые слова: взвешенные частицы, аэрозоли, аэрозольный индекс, модели переноса частиц, спутниковые наблюдения, HYSPLIT, CALIPSO, TROPOMI

Поступила в редакцию: 11.08.2022. После доработки: 19.08.2022.

Введение. Взвешенные частицы – это тип загрязнения воздуха, который образуется в результате различных видов человеческой деятельности, может перемещаться в атмосфере на большие расстояния и вызывать широкий спектр заболеваний и значительное сокращение продолжительности жизни у населения.

Частицы согласно нормативным документам различаются по размеру (PM10 (частицы диаметром <10 мкм) и PM2.5 (диаметр которых <2,5 мкм)) и химическому составу. Наибольшую опасность представляют частицы до 2,5 мкм, которые могут оставаться в атмосфере в течение нескольких дней или недель и, таким образом, могут переноситься в атмосфере на большие расстояния (до тысяч километров).

Цель данного исследования заключалась в том, чтобы определить возможную взаимосвязь между выбросами взвешенных частиц в Европе, констатации превышения предельно-допустимой концентрации (ПДК) взвешенных частиц на посту мониторинга в Крыму и связь с метеорологией.

Материалы и методы. В качестве факта превышения ПДК взвешенных частиц были выбраны данные мониторинга состояния загрязнения атмосферного воздуха в Крыму, проводившегося на одном из стационарных постов Государственной наблюдательной сети Федерального государственного бюджетного учреждения «Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». По данным наблюдений 26.12.2020 г. в 19:00 наблюдалось превышение ПДК по взвешенным веществам в 3,2 раза.

Для оценки возможного переноса частиц аэрозоля применялся ряд взаимодополняющих подходов. К таким подходам относятся:

– использование обратных траекторий движения воздушных масс для установления взаимосвязи источник-рецептор;

– комплексный анализ спутниковых наблюдений за параметрами аэрозолей.

Выявление зон с повышенной концентрацией взвешенных частиц, как источника возможного негативного воздействия, проводилось по данным отчета «Качество воздуха в Европе к 2021 году» (рис. 1) [1].

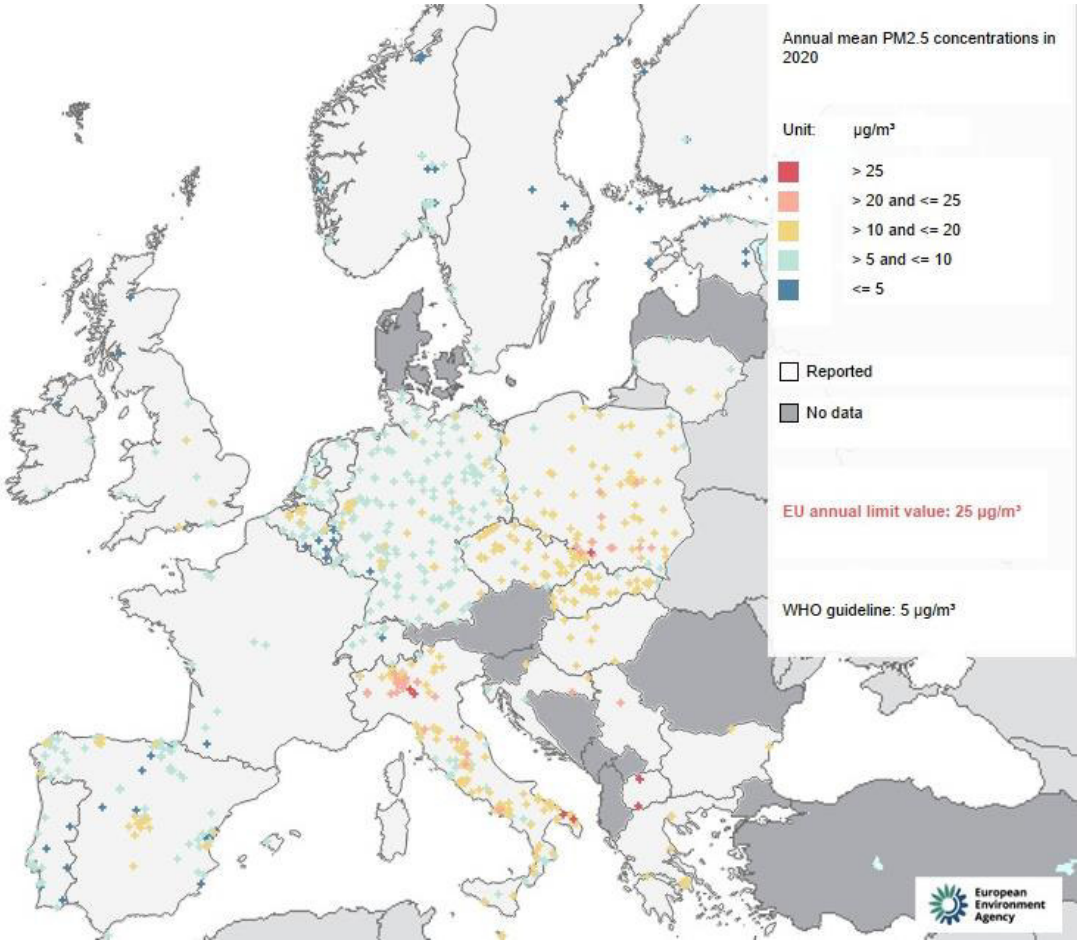


Рис. 1. Концентрации PM2,5 в 2020 году по отношению к годовому предельному значению ЕС
Fig. 1. Concentrations of PM2.5 in 2020 relative to the EU annual limit value

Из отчета следует, что все 27 стран, представивших отчеты о концентрации PM2,5 в 2020 г., зарегистрировали концентрации, превышающие требования Всемирной организации здравоохранения в 25 мг/м^3. Самые высокие концентрации были обнаружены в центральной, восточной Европе и северной Италии, которые обозначены на рис. 1 преимущественно красным и желтым цветом точек. Данные территории были выбраны в качестве источника выбросов для исследования.

Для оценки переноса воздушных масс обычно используется ряд моделей, прогнозирующих возможные траектории движения воздушных масс, как в прямом, так и в обратном направлении относительно исследуемого временного интервала, соответственно метеорологическим данным, например, модель HYSPLIT [2].

С целью проведения исследований событий, которые уже произошли, модель HYSPLIT зарекомендовала себя наилучшим образом. Модель была разработана Лабораторией воздушных ресурсов NOAA (Национального Управления океанических и атмосферных исследований). Для проведения вычислений с помощью модели HYSPLIT используются данные метеорологических наблюдений, ассимилированные для получения наборов данных ре-анализа. Набор таких данных включен в программный комплекс модели HYSPLIT.

При проведении анализа спутниковых данных использовались данные Национального управления по аэронавтике и исследованию космического про-

странства (NASA). NASA и его международные партнеры управляют несколькими спутниками (Aqua, CloudSat, CALIPSO и Aura) наблюдения Земли, которые следуют один за другим по одной и той же орбитальной «траектории». Это скоординированная группа спутников, составляющая значительную часть действующих в настоящее время крупных спутниковых миссий NASA. Спутники находятся на полярной орбите. Трасса орбиты полярного спутника проходит над всеми широтами Земли, что дает неоспоримое преимущество для исследований и возможность проводить почти одновременные наблюдения за широким спектром параметров. Приборы на спутниках производят почти одновременные измерения облаков, аэрозолей, химического состава атмосферы Земли.

К данным, которые необходимы для проведения исследования, предоставляемые с приборов, установленных на спутниках, относится индекс поглощающих аэрозолей (AAI). Он указывает на присутствие повышенных концентраций поглощающих аэрозолей в атмосфере Земли. Типы аэрозолей, которые в основном наблюдаются в AAI, представляют собой пустынную пыль и аэрозоли, образовавшиеся после сжигания биомассы. AAI получаются из коэффициентов отражения, измеренных приборам GOME-2 и прибором OMI [3].

Для исследования были выбраны данные об аэрозольном индексе спутниковых наблюдений OMI (Ozone Monitoring Instrument) – спектрометра, предназначенного для измерения размеров отражённого и рассеянного в атмосфере солнечного излучения, установленном на научно-исследовательском спутнике Aura. Ключевой особенностью OMI является использование ультрафиолетового и видимого канала для определения аэрозолей, способного различать пыль, дым и сульфаты.

Также исследовались данные об аэрозольном индексе, полученные по результатам измерений прибора GOME-2, расположенного на платформе MetOp-A [4].

Еще одним инструментом для исследования были выбраны данные спутника Европейского космического агентства Copernicus Sentinel-5 Precursor. Миссия состоит из одного спутника с прибором для мониторинга тропосферы (TROPOMI). Основная цель миссии – выполнение атмосферных измерений с высоким пространственно-временным разрешением, которые используются для контроля качества воздуха, озона и ультрафиолетового излучения, а также для мониторинга и прогнозирования климата.

В данном исследовании используется результат спутниковых наблюдений – аэрозольный индекс TROPOMI (UVAI). Этот индекс может быть рассчитан при наличии облаков, чтобы обеспечить ежедневный глобальный охват. UVAI идеально подходит для отслеживания эволюции эпизодических аэрозольных шлейфов от вспышек пыли, вулканического пепла и сжигания биомассы. Положительные значения UVAI, как правило, означают наличие в атмосфере поглощающих аэрозолей, таких как дым, минеральная пыль или вулканические аэрозоли. Отрицательные значения означают присутствие непоглощающих аэрозолей (например, сульфатов и частиц морской соли) из природных и антропогенных источников, нулевые значения характерны для облачности [5].

При работе с данными TROPOMI использовалось интерактивное приложение, разработанное специалистами Google, которое позволяет просматривать изменения концентрации загрязняющих веществ с течением времени, используя визуализацию в виде сдвоенных карт или карты-шторки, а также графики временных изменений [6].

Для определения типа аэрозоля над исследуемым регионом были проанализированы спутниковые данные CALIPSO. Миссия CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) – американо-французский исследовательский спутник, запущенный в рамках программы

NASA EOS (Earth Observing System) и предназначенный для изучения облачного покрова Земли. Основной целью CALIPSO является проведение глобальных измерений аэрозолей и облаков. CALIPSO работает в паре с американской системой CLOUDSAT (Cloud Satellite), представляющей собой направленный в надир радар, который измеряет коэффициент обратного рассеивания от облаков в виде функции расстояния [7].

Алгоритм CALIPSO основан на моделях аэрозолей с распределением размеров в зависимости от типа и показателя преломления и может классифицировать/выбирать различные типы аэрозолей: пыль пустыни, сжигание биомассы, фоновый (чистый континентальный), загрязненный континентальный, морской, загрязненная пыль. Выбор типов аэрозолей выполняется на основе типа подстилающей поверхности (снег/лед или тундра, суша или вода), высоты идентифицированного слоя аэрозоля и измеренных значений коэффициента деполяризации линейного объема, а также интегрального ослабленного коэффициента обратного рассеяния. После выбора типа аэрозоля для оценки данных используется соответствующее, заранее определенное, лидарное соотношение.

Продукты спутниковых данных об аэрозолях в сочетании с использованием траекторной модели для изучения возможного переноса аэрозолей и реанализом метеорологических данных могут являться важной информацией, позволяющей понять пространственные масштабы переноса аэрозолей и их возможные негативные воздействия.

Несмотря на возможность негативного воздействия аэрозолей от промышленных выбросов в Европе, в литературе по-прежнему мало свидетельств о возможном их переносе в район Крымского полуострова, что обуславливает необходимость более подробных исследований по совместному использованию спутниковых наблюдений вместе с моделями переноса.

Полученные результаты. На рис. 2 показана 120-часовая обратная траектория, заканчивающаяся в 19:00 UTC для воздушных масс с начальными высотами 1000, 1500 и 2000 м. Обратные траектории начинают свое движение с северо-запада 22.12.2020 на высоте от 2000 м, проходят по территории исследования (центральная, восточная Европа) над полем выбросов взвешенных частиц. Начиная с 23 декабря, происходит планомерное снижение высоты движения воздушных масс до 500 м, фиксированное 24 декабря. В итоге воздушные массы на высоте 100, 500 и 1000 м прибывают на место наблюдения в Крыму.

Для подтверждения возможности переноса взвешенных частиц проведено исследование изменения аэрозольного индекса (UVAI), полученного по данным TROPOMI (Sentinel-5P) за период с 24.12.2020 по 27.12.2020 (рис. 3). Значение UVAI за исследуемый период изменяется в малых пределах как видно из анализа изображений (см. рис. 3) согласно размерам светло-фиолетовой области на панели измерения интерактивного приложения (от 0,05 до 0,1). Из вышеописанного можно сделать вывод о положительном значении индекса, что свидетельствует о присутствии аэрозолей над исследуемой областью, и соответствует картине передвижения воздушных масс (см. рис. 2).

На рис. 4 представлены данные об аэрозольном индексе поглощения по результатам измерений приборами OMI и GOME-2. Положительные значения индекса указывают на присутствие поглощающих аэрозолей над исследуемой областью.

Для подтверждения гипотезы, что взвешенные частицы в виде аэрозоля, образующиеся в результате выбросов над территорией Европы, могли послужить причиной превышения ПДК, были проанализированы данные миссии CALIPSO о типах аэрозоля над исследуемой территорией предполагаемого движения воздушных масс согласно даты и направлений, исследованных обратных траекторий (рис. 5). Синие и красные линии показывают отрезки траекторий пролета спутника над исследуемой территорией со сносками, указывающими время и дату пролета.

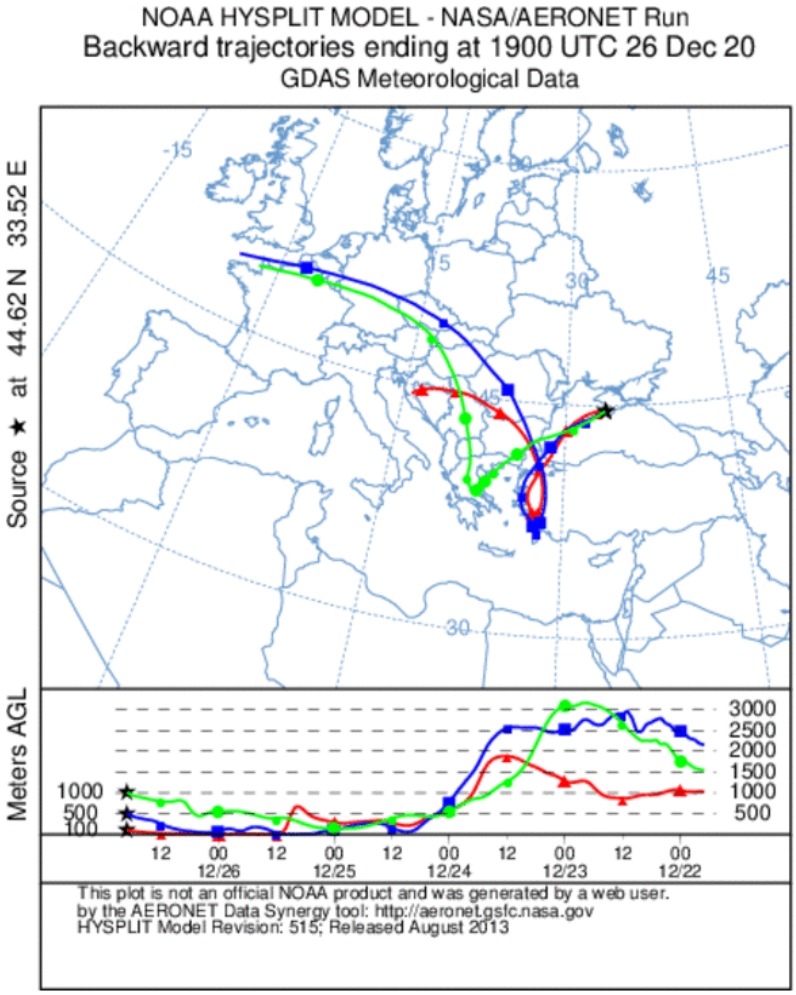


Рис. 2. Обратные пятидневные траектории движения воздушных масс по результатам моделирования HYSPLIT, заканчивающиеся в 19:00 UTC 26 декабря 2020 г.
Fig. 2. Reverse five-day trajectories of the movement of air masses according to the results of the HYSPLIT simulation, ending at 19:00 UTC on December 26, 2020

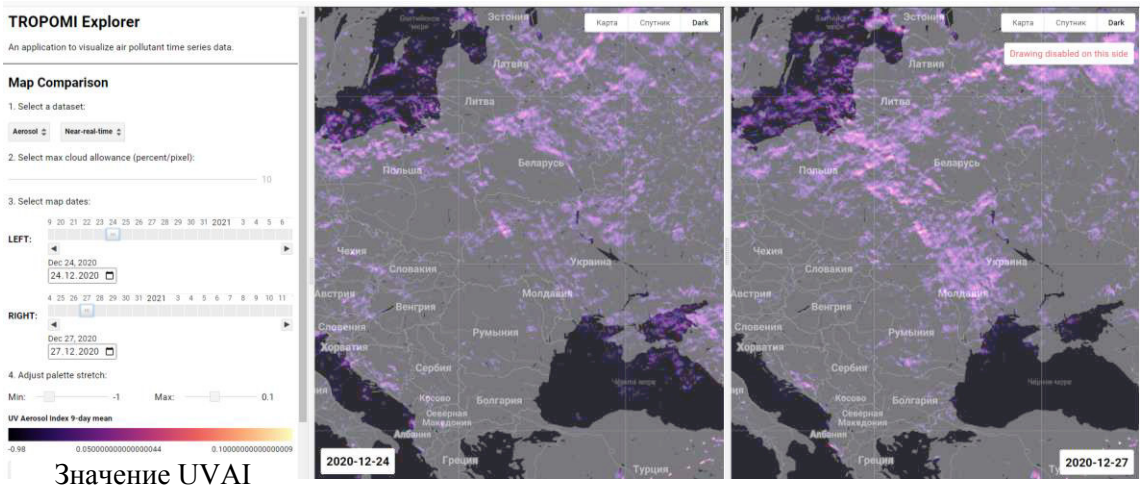
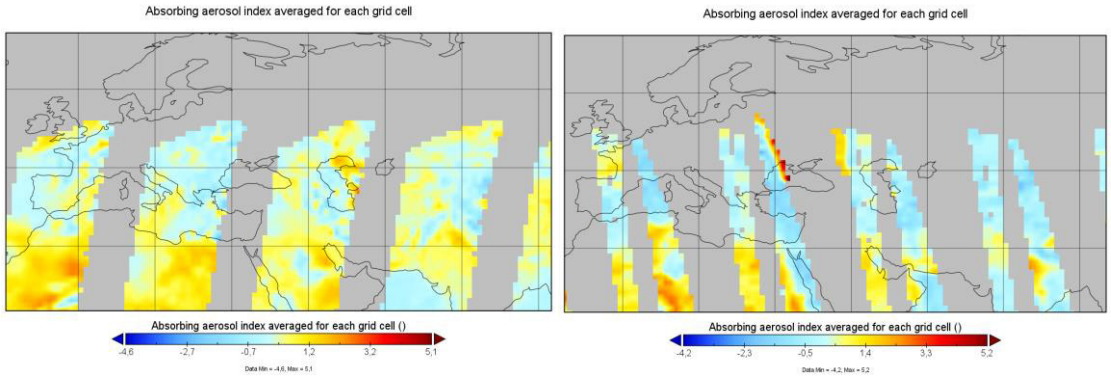


Рис. 3. Усредненные за 4 дня значения аэрозольного индекса (UVAI), полученные по данным TROPOMI (Sentinel-5P)
Fig. 3. 4-day averaged Aerosol Index (UAI) values obtained from TROPOMI (Sentinel-5P) data



а *б*

Рис. 4. Рассчитанный аэрозольный индекс по результатам прибора GOME-2 на борту спутниковой платформы MetOp-C 26.12.2020 (*а*), аэрозольный индекс поглощения по результатам прибора OMI 23.12.2020 (*б*)

Fig. 4. Calculated aerosol index based on the results of the GOME-2 instrument on board the MetOp-C satellite platform on 12/26/2020 (*a*), aerosol absorption index based on the results of the OMI instrument on 12/23/2020 (*b*)

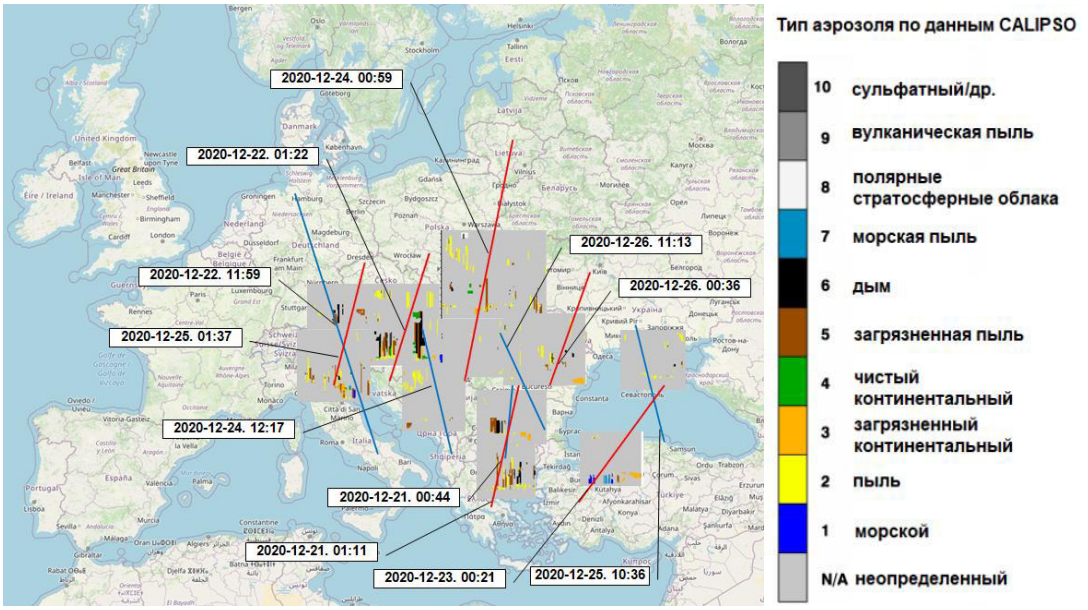


Рис. 5. Анализ переноса и типизация аэрозоля с использованием спутниковых данных и алгоритма CALIPSO

Fig. 5. Aerosol transfer analysis and typing using Satellite data and the CALYPSO algorithm

На рис. 5 выделены серые зоны с нанесенными на них цветовыми полосами, характеризующими вид аэрозоля. Цветовая характеристика аэрозоля с её расшифровкой представлена в правой части (см. рис. 5). Как видно из расшифровки цветовой типизации аэрозолей, преимущественным типом аэрозоля за исследуемый период времени является загрязненная пыль, перемещающаяся соответственно направлениям исследуемых обратных траекторий.

Заключение. Оценка негативного воздействия на экологическую обстановку от источников, расположенных на больших расстояниях, требует учета большого количества параметров атмосферы и поверхности. Поэтому разработка методологических подходов к указанной оценке является важной научной задачей.

Из проведенного исследования можно сформулировать некоторые из методологических подходов:

1. Для оценки необходимо использование различных типов наблюдений как наземных, так и дистанционных, различных носителей информации.

2. Необходимо осуществлять постоянный анализ и контроль качества измерений многообразия параметров с целью получения согласованных по различным характеристикам длительных рядов наблюдений.

3. Применять для исследования различные типы приборов, использующих различные принципы измерений.

4. Стремиться к получению синергетического комплексного эффекта при использовании различных систем и методов наблюдений для измерений конкретного параметра.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0012-2021-0007 «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. https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021 / (дата обращения: 09.08.2022).

2. *Draxler R.R., Hess G.* Description of the HYSPLIT4 modeling system, 1997.

3. https://earth.esa.int/eogateway/missions/aeolus / (дата обращения: 09.08.2022).

4. https://www.temis.nl/airpollution/absaai / (дата обращения: 09.08.2022).

5. https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p (дата обращения: 09.08.2022).

6. https://www.earthengine.app/ (дата обращения: 09.08.2022).

7. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm / A.H. Omar [et al.] // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. Vol. 26, iss. 10. P. 1994–2014. doi:10.1175/2009JTECHA1231.1.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING A POSSIBLE NEGATIVE IMPACT ON THE ENVIRONMENTAL SITUATION OF POLLUTION SOURCES FROM EUROPE

A.A. Egorkin

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

The paper presents methodological approaches to assessing a possible negative impact of emission sources from Europe containing suspended particles on the ecological situation of the city of Sevastopol. The research methodology is based on the joint use of a trajectory model of transfer and analysis of satellite observations. For the analysis, a case of exceeding the maximum permissible concentration of suspended particles is taken, registered at the observation post in the city of Sevastopol. Five-day reverse trajectories ending at the observation point are studied. The analysis of the data of satellite observations of the aerosol movement over the studied area is carried out. The main types of aerosols are determined using the CALIPSO algorithm.

Keywords: suspended particles, aerosols, aerosol index, particle transport models, satellite observations, HYSPLIT, CALIPSO, TROPOMI

REFERENCES

1. https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021 / (August 09, 2022).

2. *Draxler R.R. and Hess G.* Description of the HYSPLIT4 modeling system, 1997.

3. https://earth.esa.int/eogateway/missions/aeolus / (August 09, 2022).

4. https://www.temis.nl/airpollution/absaai / (August 09, 2022).

5. https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p (August 09, 2022).

6. https://www.earthengine.app/ (August 09, 2022).

7. *Omar A.H., David M.W., Chieko K., Mark A.V., Zhaoyan Liu., Charles R.T., Raymond R.R., Richard A.F., Kam-Pui Lee, Ralph E.K., and Chris A.H.* The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, Vol. 26, Iss. 10, pp. 1994–2014. doi:10.1175/2009JTECHA1231.1.

УДК 349.6 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-51-61

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ СИТУАЦИЙ В СЕВАСТОПОЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

Г.А. Сигора, Л.А. Ничкова, Т.Ю. Хоменко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: sigora1@yandex.ru; tamara_homenko93@mail.ru

В статье приведен анализ аварийных ситуаций техногенного характера в Севастопольском регионе. Проанализированы потенциальные опасности в промышленности и энергетике, радиационная опасность, опасности на транспорте. Приводится оценка состояния защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Также представлены результаты расчета величины индивидуального риска ЧС для города Севастополя. На основе имеющихся данных составлен прогноз техногенных чрезвычайных ситуаций на 2022-2023 годы.
Ключевые слова: техногенные чрезвычайные ситуации, статистика, прогноз, Севастопольский регион, риск, защита населения

Поступила в редакцию: 13.07.2022. После доработки: 16.08.2022.

Введение. Взаимодействие человека со средой обитания характеризуется в настоящее время все более возрастающим антропогенным влиянием на ее природную составляющую. Интенсификация потоков вещества, энергии и информации в системе «человек – среда обитания» в результате хозяйственной деятельности, развитие техносферы, увеличение антропогенной нагрузки, социальные катаклизмы – все это увеличивает риски реализации опасностей, последствия которых могут причинить непоправимый вред человеку и среде обитания.

Ряд крупных аварий и катастроф, произошедших за последние два десятилетия, привел к изменению отношения к проблеме риска чрезвычайных ситуаций (ЧС) как природного, так и техногенного характера с большими значениями ущерба. Появились работы, указывающие на возможность получения существенно более высоких значений вероятности наступления стихийных бедствий и техногенных катастроф, по сравнению с ранее прогнозируемыми [1–3].

На сегодняшний день развиваются методы обработки статистических данных о чрезвычайных ситуациях с использованием графической техники и методы исследования динамических изменений вероятностных распределений для прогнозирования риска ЧС [1, 3]. Также разрабатываются рекомендации по выбору методов анализа риска аварий для различных видов деятельности и основных стадий жизненного цикла опасного производственного процесса [4].

Анализ существующих методик прогнозирования ЧС техногенного характера как долгосрочного, так и оперативного прогноза представлен в публикации за 2022 г. [5]. Авторы данной статьи считают, что выбор конкретного метода зависит, в том числе, и от вида прогнозируемых ЧС. Так, например, прогнозирование природных и биолого-социальных ЧС обладает большей степенью неопределенности, чем прогнозирование техногенных ЧС.

Однако здесь возникает известное противоречие, чем больше горизонт прогноза, тем меньше его точность. Необходима оптимизация данного прогноза, т.е. в зависимости от решаемой проблемы необходимо оптимальное сочетание параметров: точность прогноза и глубина прогноза риска ЧС техногенного характера [6].

Для Крымского полуострова и Севастопольского региона в целях реализа-

ции Плана организационно-штатных мероприятий по созданию Главного управления МЧС России по Республике Крым и Главного управления МЧС России по г. Севастополю, утвержденного решением Коллегии МЧС России 25.03.2014 № 1, было проведено комплексное исследование влияния рисков природных и техногенных ЧС на безопасность жизнедеятельности населения Республики Крым и г. Севастополя [7].

Целью данной статьи является проанализировать аварийные ситуации техногенного характера в Севастопольском регионе и составить прогноз техногенных ЧС на 2022-2023 годы.

Материалы и методы. Комплексный анализ и прогнозирование техногенных чрезвычайных ситуаций в Севастопольском регионе выполнены на основе информационного анализа, с использованием статистических данных, опубликованных на официальных сайтах органов государственной власти в открытом доступе.

Потенциальные опасности в промышленности и энергетике. В жилищно-коммунальном хозяйстве г. Севастополя функционирует 132 котельных, 5 водозаборов, 2 очистных сооружений водопровода, 9 очистных сооружений канализации. Протяженность тепловых сетей составляет 630,5 км, водопроводных 1144,94 км, канализационных 607,1 км, электрических 2938,1 км. По территории города проходит свыше 200 км железнодорожных путей, более 70 км морских судоходных путей, более 759 км автомобильных дорог, более 140 км газопроводов.

Основным поставщиком тепловой энергии в городе является ГУПС «Севтеплоэнерго». В городе также функционируют ведомственные котельные и теплоэнергетические предприятия других форм собственности.

Причинами техногенного характера, влияющими на возникновение аварийных ситуаций на объектах и теплоэнергосетях ГУПС «Севтеплоэнерго», являются:

– прекращение подачи газа, электроэнергии и воды на объекты предприятия;

– износ тепловых сетей, оборудования котельных и распределительных теплопунктов.

Снижение давления газа в подающих газопроводах до 0,8 кг/см^2 приведет к остановке котельных и прекращению подачи тепловой энергии 75% потребителям города. Без тепловой энергии останется около 300 тыс. жителей.

Наибольшую вероятность возникновения аварий на коммунальных теплосетях города могут вызвать повреждения трасс теплопроводящих труб. Изношенность теплотрасс ГУПС «Севтеплоэнерго» составляет 92%. 80% тепловых трасс имеют срок эксплуатации более 25 лет. Работы по обновлению выполняются в соответствии с актуализированной «Схемой теплоснабжения города Севастополя на период до 2035 года» [8].

Вероятным является также выход из строя котлов и оборудования котельных, что в свою очередь повлечет прекращение подачи тепловой энергии потребителям на сроки более продолжительные, чем аварии на теплотрассах.

Причинами техногенного характера, влияющими на возникновение аварийных ситуаций на объектах и водопроводных сетях ГУПС «Водоканал», являются:

– прекращение подачи электроэнергии на объекты предприятия;

– износ водопроводных сетей, оборудования гидроузлов, труб главного напорного канализационного коллектора и канализационных насосных станций.

Водопроводные сети, сети канализации, оборудование насосных станций, электрохозяйство имеет износ более 50%.

Зависимость водоснабжения от погодных условий (от количества осадков) носит сезонный характер.

При перебоях в энергоснабжении возможен гидроудар на водоводах и напорных коллекторах, который приводит к образованию порывов в магистральных водоводах и напорных коллекторах.

При этом возможно прекращение подачи воды на срок от 8 до 10 часов в районы города с населением свыше 50 тыс. человек.

Время полного отключения от электроэнергии потребителей объектов ГУП С «Водоканал» регламентируется его возможностями по водоснабжению и составляет не более 8 часов, по водоотведению и канализованию – не более 1,5 часов.

Остановка КНС при отключении электроэнергии приведет к аварийному сбросу неочищенных сточных вод в акваторию Севастопольских бухт объемом свыше 100 $м^3$ в час и аварийному переполнению резервуаров промежуточных КНС.

На канализационных очистных сооружениях через два часа после отключения электроэнергии гибнут анаэробные бактерии, производящие полную биологическую очистку сточных вод. Возобновление жизнедеятельности анаэробных бактерий возможно не ранее, чем через 2-3 месяца.

Наибольшую вероятность возникновения аварий на магистральных водоводах, влекущих за собой возникновение чрезвычайной ситуации, могут вызвать повреждения и разрушения труб вследствие длительной эксплуатации, значительно превышающей установленные сроки.

Повреждения и разрушения труб могут привести к прекращению подачи воды на период до 8 часов в районы города с населением свыше 50 тыс. человек.

При аварии на ТЭС г. Севастополя возможно нарушение условий жизнедеятельности населения в количестве до 380 тыс. чел. и причинение материального ущерба до 30 млн руб.

При авариях на электросетях возможно нарушение условий жизнедеятельности до 200 тыс. чел. и причинение материального ущерба до 12–16 млн руб.

В целом аварии приводят к остановке производственной деятельности предприятий и организаций, сельскохозяйственным предприятиям, нарушениям транспортного сообщения, нарушению жизнедеятельности населению.

Факторами техногенного характера, влияющими на возникновение аварийных ситуаций в питающих энергосетях города, являются:

– аварии на потенциально-опасных объектах;

– аварии на объектах энергосистемы г. Севастополя;

– износ электролиний, оборудования подстанций и распределительных узлов.

Возможными причинами возникновения ЧС на объектах энергетики в следствии возникновения возможных аварий и природных явлений являются:

– выход из строя трансформаторных подстанций из-за значительного физического износа;

– террористические акты;

– выход из строя систем защиты и автоматики;

– повреждение и падение опор линий электропередач;

– повреждение воздушных линий электропередач и другого сетевого электрооборудования из-за несоответствия их прочностных характеристик существующим ветровым нагрузкам.

Возникновение аварийных ситуаций в питающих энергосетях города приведет к обесточиванию населенных пунктов, объектов жизнеобеспечения (водо-, теплоснабжения, канализования), очистных сооружений, лечебных учреждений, предприятий пищевой и перерабатывающей промышленности.

Риск возникновения аварии с выбросом химически опасных веществ на территории г. Севастополя возможен в ООО «Холод-Юг», где эксплуатируется одна аммиачная холодильная установка в зоне промышленной застройки.

Результатом нарушения технологического процесса на аммиачно-холодильной установке может стать разгерметизация, которая приведет к выбросу в атмосферу АХОВ (аммиака) в количестве 7 тонн и образованию облака зараженного воздуха.

В случае возникновения пожаров на объектах хранения легковоспламеняющихся, горючих и взрывчатых веществ (на крупных предприятиях, хранящих и перерабатывающих), возможно образование обширных зон пожаров, заражения атмосферы продуктами горения, что повлечет за собой необходимость отселе-

ния людей из прилегающих зданий. В г. Севастополе такими предприятиями являются нефтебазы ОАО «Югторсан» и ООО «КЕДР», резервуарный парк Балаклавской ТЭС ООО «ВО Технопромэкспорт», топливный склад ОП ФГУП «Крымская железная дорога».

При техногенных авариях можно выделить следующие основные опасности: взрыв, пожар, утечки (переливы) газов и жидкостей. В результате аварий происходит отравление персонала токсическими веществами и загрязнение окружающей природной среды.

К основным поражающим факторам при взрывах относятся: ударная волна и осколочное поражение. Воздушная ударная волна взрыва может вызывать разрушения или повреждения зданий городской застройки, промышленных зданий и сооружений, систем электро-, газо- и водоснабжения, транспортных средств.

Аварии, связанные со взрывами, часто сопровождаются пожарами. Взрыв иногда может привести к незначительным разрушениям, но связанный с ним пожар может вызвать катастрофические последствия и последующие, более мощные взрывы и более сильные разрушения.

Поражающими факторами пожара, воздействующими на людей и материальные ценности, в общем случае являются: открытый огонь и искры, тепловое излучение, горячие и токсичные продукты горения, дым, повышенная температура воздуха и предметов, пониженная концентрация кислорода, обрушение и повреждение конструкций, зданий и сооружений.

Наибольшую угрозу для инфраструктуры и жителей города представляет риск возникновения пожара на нефтебазе ООО «Кедр» по ул. Энергетиков. При неблагоприятном развитии ситуации в зоне поражения могут оказаться строения на землях бывшего совхоза им. Софьи Перовской, насосная станция ГУП «Водоканал», ГБДОУ «Детский сад № 26».

Риск возникновения гидродинамической аварии на территории г. Севастополя возможен в случае прорыва дамбы Чернореченского водохранилища. При этом в зоне затопления окажутся населенные пункты, расположенные по руслу р. Черная – с. Озерное (153 чел.), с. Черноречье (354 чел.), с. Хмельницкое (661 чел.), с. Штурмовое (1535 чел.), ул. Чернореченская (г. Инкерман), в связи с чем в зоне подтопления окажется 28 млн м^2 территории Балаклавского района, 6 населенных пунктов, до 263 жилых дома, до 9 км автодорог, до 9 км железнодорожных путей, 1 железнодорожный и 4 автомобильных моста. В зоне подтопления может оказаться более 3 000 чел., ГБОУ «Общеобразовательная школа № 36» (с. Хмельницкое), почтовое отделение № 299044 Обособленного подразделения Севастопольский почтамт – филиал ФГУП «Почта Крыма» (с. Хмельницкое), Храм Рождества св. Иоанна Предтечи (с. Хмельницкое).

В случае прорыва дамбы Загорского водохранилища (Бахчисарайский район) в зоне затопления окажутся населенные пункты, расположенные по руслу р. Кача – с. Вишневое (747 чел.), с. Орловка (847 чел.), до 784 жилых домов, до 4 км автодорог, 2 автомобильных моста, газораспределительная станция «Вишневое», храм Казанской Божией Матери. В зоне подтопления может оказаться около 1600 человек.

Радиационная опасность. На территории г. Севастополя находится один радиационно опасный объект – исследовательский реактор ИР-100 Института ядерной энергетики и промышленности ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (ул. Курчатова, 7), который в результате террористического воздействия представляет опасность для обслуживающего персонала и для населения в пределах санитарно-защитной зоны.

Радиационная обстановка в течение 2014–2021 гг. на территории г. Севастополя была в норме и остается стабильной, уровень гамма-фона не превышает многолетних наблюдений и составляет 0,09–0,12 мкР/ч.

Опасности на транспорте. Система городского пассажирского транспорта

общего пользования в г. Севастополе представлена четырьмя видами транспорта: наземным электрическим (троллейбус), автомобильным (автобус), железнодорожным (электропоезда) и водным (морским) (катер и паром).

Основными причинами дорожно-транспортных происшествий на автодорогах являются:

– нарушение правил дорожного движения водителями транспортных средств;

– недостаточная квалификация водителей автотранспорта;

– техническая неисправность транспортных средств, а также неправильное размещение и крепление груза;

– недисциплинированность и нарушение правил дорожного движения другими участниками движения (пешеходы, велосипедисты и т. д.);

– неудовлетворительные дорожные условия и недостатки в организации движения;

– увеличение интенсивности перевозок пассажиров и грузов автомобильным транспортом.

Средний возраст автобусов и троллейбусов, задействованных в перевозках по установленным маршрутам регулярных перевозок г. Севастополя, составляет около 5 лет.

Условиями государственных контрактов на осуществление регулярных перевозок пассажиров и багажа в г. Севастополе определен максимальный средний срок эксплуатации транспортных средств на маршрутах города, что предусматривает регулярное обновление пассажирского автобусного парка на всех городских и пригородных маршрутах.

Так, в рамках программы некоммерческого лизинга наземного пассажирского и морского транспорта на территориях Республики Крым и г. Севастополя, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.12.2014 № 2788-р [9], в ГУП «Севэлектроавтотранс им. А.С. Круподерова», выполняющим 55% объема перевозок пассажиров по муниципальным маршрутам регулярных перевозок г. Севастополя, постоянно происходит обновление подвижного состава.

Для снижения количества дорожно-транспортных происшествий и обеспечения безопасности, руководством предприятий, обеспечивающих перевозки по утвержденным маршрутам регулярных перевозок г. Севастополя, регулярно проводятся вводные, периодические, предрейсовые и специальные инструктажи по безопасности движения.

Также, в рамках Государственной программы г. Севастополя «Развитие дорожно-транспортной инфраструктуры города Севастополя», утвержденной постановлением Правительства Севастополя от 17.11.2016 № 1090-ПП [10], реализуются мероприятия в области безопасности и организации дорожного движения на территории г. Севастополя.

По состоянию на декабрь 2021 г. доля автомобильных дорог регионального значения г. Севастополя, соответствующих нормативным требованиям, составляет 59,49%, что превышает запланированный показатель на текущий год (55,5%) на 3,99%.

За 12 месяцев 2021 г. в г. Севастополе зарегистрировано 598 дорожно-транспортных происшествия (ДТП), в результате которых погибло 33 чел., пострадало 759 чел. [11].

В сравнении с аналогичным периодом 2020 г. общее количество ДТП увеличилось на 15,4% (с 506 до 598). Количество погибших в ДТП увеличилось на 27,3% (с 24 до 33). Количество травмированных увеличилось на 17,1% (с 629 до 759) [12].

Основными причинами возникновения ЧС на водном (морском) транспорте являются:

– человеческий фактор (отсутствие чувства ответственности, беспечность, пренебрежение мерами безопасности, недостаточная профессиональная подготовка, низкая подготовка судовой и спасательной служб), который явился причиной посадки на мель, столкновения с другими судами либо с неподвижными

предметами, перегрузки судна, неправильного расположения грузов, неудачной швартовки;

– неблагоприятные погодные (природные) явления (шторм, туман);

– технические неисправности (дефекты корпуса, просчеты и ошибки при проектировании и строительстве судов, некачественный ремонт, старение судов);

– пожары и взрывы на борту судна.

Основными причинами гибели людей при авариях на судах являются:

– утопление и переохлаждение людей при попадании в воду;

– травмы, полученные при ударах или падении с борта судна;

– ожоги и отравление продуктами горения при пожаре на судне.

Одними из последствий ЧС на морском транспорте являются разлив нефтепродуктов, образование крупных нефтяных пятен на акватории моря и побережье, уничтожение пляжей, нанесение экологического ущерба окружающей среде.

Организация и оказание помощи терпящим бедствие судам отличаются исключительной сложностью, затруднены розыск пораженных и оказание им медицинской помощи.

Также стоит отметить, что в акватории Черного моря г. Севастополя отсутствуют соответствующие расчеты сил и средств Азово-Черноморского филиала ФГБУ «Морспасслужба» для реагирования и ликвидаций возможных ЧС, обусловленных аварийным разливом нефтепродуктов.

Обновление водного транспорта, осуществляющего перевозки по установленным маршрутам г. Севастополя, запланировано **в** рамках реализации мероприятия по обновлению пассажирского флота Государственной программы г. Севастополя «Развитие дорожно-транспортной инфраструктуры города Севастополя», утвержденной постановлением Правительства Севастополя от 17.11.2016 № 1090-ПП [10].

Чрезвычайные ситуации при эксплуатации водного (морского) транспорта в 2021 г. не возникали.

Аварии на железнодорожном транспорте могут возникнуть в результате ошибочных действий персонала, а также вследствие не проведенных своевременно проверок состояния ж/д путей, провисания рельсов, надернутых костылей; что может привести к уширению пути и провалам колёсных пар вагонов во внутрь рельсовой колеи с последующим сходом вагонов.

Если авария принимает крупные масштабы, то опасные факторы пожара (взрыва) и вредные токсичные вещества могут привести к массовому поражению производственного персонала и населения на прилегающей к объектам железнодорожного транспорта территории, а также к разрушению конструкций, зданий и сооружений.

Особо опасными будут являться аварии на объектах железнодорожного транспорта, которые сопровождаются пожарами (взрывами) цистерн с легко воспламеняющими и горючими жидкостями (ЛВЖ и ГЖ) и сжиженными углеводородными газами (СУГ), а также разливом (выбросом) горючих жидкостей и аварийных химически-опасных веществ (АХОВ). Немалую опасность представляют также пожары твердых горючих материалов (ТГМ) в подвижном составе и на производственных объектах железнодорожного транспорта. В связи с этим определение зон воздействия опасных факторов при аварийных ситуациях с опасными грузами на объектах железнодорожного транспорта имеет важное значение.

В 2021 г. на территории г. Севастополя чрезвычайных ситуаций ЧС на объектах железнодорожного транспорта не зарегистрировано.

На территории г. Севастополя могут возникнуть чрезвычайные ситуации, связанные с авиационным событием, что приведет к необходимости оказания своевременной помощи экипажам и пассажирам воздушных судов, пострадавшим в результате авиационного происшествия.

Авиационные события могут возникать на воздушных судах, начиная с момента запуска двигателей, при взлете, в полете, до момента их выключения. Статистика свидетельствует, что почти половина аварий и катастроф происходит на аэродроме, а половина – в воздухе на разных высотах (в том числе над труднодоступными территориями и потенциально опасными объектами).

К основным видам поражения при авиационных катастрофах принадлежат механические (динамические) и ожоговые травмы. Возможно кислородное голодание вследствие разгерметизации салона самолета, находящегося на большой высоте.

Учитывая плотность населения (около 500 чел./км^2), наличие на территории г. Севастополя потенциально опасных объектов, возможно возникновение вторичных факторов авиационного происшествия, значительно усложняющих ведение поисковых и аварийно-спасательных работ и увеличивающих масштабы ЧС и тяжесть их последствий.

В 2021 г. на территории г. Севастополя ЧС на объектах воздушного транспорта не зарегистрировано.

Возможны риски возникновения аварий на участке отвода к Севастопольской ПГУ-ТЭС магистрального газопровода высокого давления «Керчь – Симферополь – Севастополь» ГУП РК «Черноморнефтегаз».

Основными причинами аварий на магистральных газопроводах являются:

– коррозионное разрушение газопроводов;

– брак строительно-монтажных работ;

– обобщенная группа механических повреждений (случайное повреждение при эксплуатации, террористические акты, природные воздействия);

– заводские повреждения труб.

Основными поражающими факторами при авариях на магистральных газопроводах являются:

– осколки разрушенного магистрального газопровода;

– воздушная ударная волна и волна сжатия при разрыве магистрального газопровода;

– динамическое давление высокоскоростных струй газа;

– загазованность;

– тепловая радиация от пожара (в т.ч. прямого воздействия пламени).

В 2021 г. на территории г. Севастополя ЧС на объектах трубопроводного транспорта не зарегистрировано. Нефтепроводы и продуктопроводы на территории г. Севастополя отсутствуют.

Обобщенный показатель состояния защиты населения от ЧС. Оценка состояния защиты населения от ЧС осуществляется путем сравнения величины индивидуального риска ЧС с допустимым индивидуальным риском ЧС для субъекта Российской Федерации, установленным ГОСТ Р 22.10.02-2016 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Менеджмент риска чрезвычайной ситуации. Допустимый риск чрезвычайной ситуации» [13].

Величина индивидуального риска ЧС определяется отношением числа погибших при реализации потенциальных опасностей к численности населения субъекта Российской Федерации.

Согласно данным Управления Федеральной службы государственной статистики по Республике Крым и г. Севастополю численность населения г. Севастополя по состоянию на 01.01.2021 составила 509 992 чел. (на 01.01.2020 – 449 138 чел.).

Допустимый риск чрезвычайной ситуации для г. Севастополя согласно ГОСТ Р 22.10.02-2016 составляет $1{,}19\times10^{-5}$ [13].

Согласно примечанию пункта 3.2 ГОСТ Р 22.10.02-2016 индивидуальный риск чрезвычайной ситуации считается недопустимым, если он более чем в 10 раз превышает допустимый индивидуальный риск чрезвычайной ситуации.

Индивидуальный риск для г. Севастополя считается допустимым (табл. 1).

Таблица 1. Индивидуальный риск гибели для г. Севастополя

Федеральный округ, субъект Российской Федерации	Индивидуальный риск гибели				
	при пожарах	в ЧС	на водных объектах	обобщенный	допустимый (ГОСТ Р 22.10.02) [11]
Южный федеральный округ, г. Севастополь	$3,5\times10^{-5}$	$1,2\times10^{-5}$	$1,2\times10^{-5}$	$5,9\times10^{-5}$	$1,19\times10^{-5}$

Оценка состояния защиты населения и территорий от ЧС природного и техногенного характера. Постоянными источниками рисков для жизнедеятельности населения и территорий г. Севастополя являются следующие потенциальные опасности:

– пожары;

– ДТП;

– техногенные, природные и биолого-социальные ЧС;

– происшествия на водных объектах.

Снижение рисков потенциальных опасностей для жизнедеятельности населения и территорий всех типов и масштабов, и их негативных последствий обеспечивается путем реализации следующих основных направлений:

– совершенствование нормативных правовых, методических и организационных основ управления в области повышения безопасности населения и защищенности критически важных объектов от угроз природного и техногенного характера;

– совершенствование систем мониторинга и прогнозирования ЧС;

– создание комплексной системы информирования и оповещения населения в местах массового пребывания людей;

– развитие и совершенствование технических средств и технологий повышения защиты населения и территорий от опасностей, обусловленных возникновением ЧС, а также средств и технологий ликвидации чрезвычайных ситуаций;

– развитие инфраструктуры информационного обеспечения и ситуационного анализа рисков ЧС;

– развитие и совершенствование системы подготовки населения.

Заключение. В 2022-2023 гг., исходя из данных среднестатистических наблюдений на территории г. Севастополя, прогнозируется ежегодно 1-2 чрезвычайных ситуации техногенного характера не выше межмуниципального уровня.

Прогноз техногенных ЧС на 2022-2023 гг. представлен в табл. 2.

Таблица 2. Прогноз техногенных чрезвычайных ситуаций на 2022-2023 гг.

Параметры техногенной обстановки	Средне-многолетние значения	Фактическое значение за 2021 г.	Расчетное прогнозное значение на 2022-2023 гг.	Прогноз на 2022-2023 гг.
Аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения	0	0	0	**1**
Аварии на электроэнергетических системах	0	0	0	**1**
Обрушение зданий и сооружений	0	0	0	**1**

Продолжение таблицы 2

Параметры техногенной обстановки	Средне-многолетние значения	Фактическое значение за 2021 г.	Расчетное прогнозное значение на 2022-2023 гг.	**Прогноз на 2022-2023 гг.**
Крупные дорожно-транспортные происшествия	1	2	0	**1**
Авиационные катастрофы	0	0	0	**0**
Аварии на железнодорожном транспорте	0	0	0	**1**
Аварии на морских и речных пассажирских и грузовых судах	0	0	0	**1**
Аварии на магистральных трубопроводах	0	0	0	**1**
Общее количество техногенных ЧС	**1**	**2**	**0**	**7**

Причиной возникновения в 2022-2023 гг. ЧС техногенного характера на территории г. Севастополя могут явиться:

– аварии на коммунальных системах жизнеобеспечения, аварии на электроэнергетических системах (пик – осенне-зимний период).

Существует вероятность возникновения ЧС, связанных с авариями на коммунальных системах жизнеобеспечения. Также высок риск нарушений в работе объектов энергоснабжения.

Аварии на системах жизнеобеспечения населения, учитывая высокую степень износа оборудования, возможны на всей территории г. Севастополя, например, аварии на автомобильных дорогах, на морском, речном и воздушном транспорте.

Основными причинами крупных ДТП будут являться нарушения правил дорожного движения, неудовлетворительное состояние дорожного полотна, неблагоприятные погодные условия, а также постоянно возрастающая антропогенная нагрузка.

Высок риск возникновения ДТП с участием мото- и велотранспорта.

Наибольшая вероятность крупных ДТП прогнозируется на территории Гагаринского и Нахимовского районов. Количество дорожно-транспортных происшествий прогнозируется выше среднемноголетних значений.

Аварии на морских судах могут произойти из-за навигационных ошибок экипажа в совокупности с плохими погодными условиями.

Также в осенне-летний период существует риск происшествий, связанных с авариями на судах малой авиации и самодельных летательных аппаратах, а также пожары и взрывы бытового газа.

В осенне-зимний период при понижении среднесуточных температур и использовании населением отопительных приборов, повышается риск возникновения техногенных пожаров в жилом секторе. Не исключается возникновение техногенных пожаров в связи с использованием газобаллонного оборудования, в том числе со взрывом.

В течение года возможны аварии при транспортировке аварийно-опасных химических веществ и взрывоопасных веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акимов В.А., Быков А.А., Щетинин Е.Ю.* Введение в статистику экстремальных значений и ее приложения: монография. МЧС России. М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). 2009. 524 с. https://elibrary.ru/item.asp?id=15549489 (дата обращения: 11.07.2022).

2. *Акимов В.А., Владимиров В.А., Измалков В.И.* Катастрофы и безопасность. М.: Деловой экспресс. 2006. 392 с.

3. *Быков А.А.* Прогнозирование риска чрезвычайных ситуаций на основе классических результатов асимптотической теории вероятностей экстремальных событий // Безопасность критичных инфраструктур и территорий: тезисы докладов II Всерос. науч.-техн. конф. и XII Школы молодых ученых. Екатеринбург: УрО РАН. 2008. С. 10-11.

4. *Федосов А.В., Маннанова Г.Р., Шипилова Ю.А.* Анализ опасностей, оценка риска аварий на опасных производственных объектах и рекомендации по выбору методов анализа риска // Нефтегазовое дело. 2016. № 3. С. 322–336. https://elibrary.ru/item.asp?id=26255282 (дата обращения: 11.07.2022).

5. *Грабельников А.С.* Сравнительный анализ существующих методик прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного характера // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. Т. 1 (42). С. 10–13. https://elibrary.ru/item.asp?id=48214860 (дата обращения: 11.07.2022).

6. *Меликова М.Т.* Методы прогнозирования рисков техногенных чрезвычайных ситуаций // Достижения науки и образования. 2018. Т. 8(30). С. 21–23.

7. *Верескун А.В., Файзулин Т.Ш., Олтян И.Ю., Байда С.Е., Зиновьев С.В., Барышев Е.М., Балер М.А., Булгакова Е.Ю.* Комплексное исследование влияния рисков природных и техногенных чрезвычайных ситуаций на безопасность жизнедеятельности населения Республики Крым и г. Севастополя. М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ). 2015. 208 с.

8. *Схема* теплоснабжения города Севастополя на период до 2035 г. (утверждаемая часть), актуализированная версия. [Электронный источник]. https://sev.gov.ru/docs/250/126590 (дата обращения: 11.07.2022).

9. *Распоряжение* Правительства РФ от 30.12.2014 N 2788-р (ред. от 06.11.2021) «Об утверждении программы некоммерческого лизинга наземного пассажирского и морского транспорта на территориях Республики Крым и г. Севастополя». [Электронный источник]. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173907 (дата обращения: 11.07.2022).

10. *Постановление* от 17.11.2016 № 1090-ПП «Об утверждении государственной программы города Севастополя «Развитие транспорта и дорожно-транспортной инфраструктуры...». [Электронный источник] https://sev.gov.ru/docs/253/29190 (дата обращения: 11.07.2022).

11. *Официальный* портал «Госавтоинспекция». [Электронный источник]. http://stat.gibdd.ru (дата обращения: 11.07.2022).

12. *Город* Севастополь в цифрах 2021 г.: Крат. стат. сб. / Крымстат- С. 2022. 199 с.

13. *ГОСТ* Р 22.10.02-2016 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Менеджмент риска чрезвычайной ситуации. Допустимый риск чрезвычайных ситуаций» [Электронный источник]. https://internet-law.ru/gosts/gost/62126/ (дата обращения: 11.07.2022).

ANALYSIS AND FORECAST OF MAN-MADE EMERGENCIES SITUATIONS IN THE SEVASTOPOL REGION

G.A. Sigora, L.A. Nichkova, T.Yu. Khomenko

Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The article provides an analysis of man-made emergencies in the Sevastopol region. Potential hazards in industry and energy, radiation hazard, transport hazards are analyzed. An assessment of the state of protection of the population and territories from natural and man-made emergencies is given. The results of calculating the magnitude of the individual risk of emergencies for the city of Sevastopol are also presented. Based on the available data, a forecast of man-made emergencies for 2022-2023 is made.
Keywords: technogenic emergencies, statistics, forecast, Sevastopol region, risk, population protection

REFERENCES

1. *Akimov V.A., Bykov A.A., and Shhetinin E.Ju.* Vvedenie v statistiku jekstremal'nyh znachenij i ee prilozhenija (Introduction to the statistics of extreme values and its applications). MChS Rossii. Moscow: FGU VNII GOChS (FC), 2009, 524 p.

2. *Akimov V.A., Vladimirov V.A., and Izmalkov V.I.* Katastrofy i bezopasnost (Disasters and safety). Moscow: Delovoj jekspress, 2006, 392 p.

3. *Bykov A.A.* Prognozirovanie riska chrezvychajnyh situacij na osnove klassicheskih rezul'tatov asimptoticheskoj teorii verojatnostej jekstremal'nyh sobytij (Forecasting the risk of emergency situations based on the classical results of the asymptotic theory of probability of extreme events), Tezisy dokladov II Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoj konferencii i XII Shkoly molodyh uchenyh (Safety of critical infrastructures and territories: abstracts of the II All-Russian Conference. sci.-tech. conf. and XII School of Young Scientists), Ekaterinburg, 22 October 2008, Ekaterinburg: UrO RAN, 2008, pp.10-11.

4. *Fedosov A.V., Mannanova G.R., and Shipilova Ju.A.* Analiz opasnostej, ocenka riska avarij na opasnyh proizvodstvennyh obektah i rekomendacii po vyboru metodov analiza riska (Risk Assessment of Accidents at Hazardous Industrial Facilities and Recommendations on the Choice of Risk Analysis Methods). *Neftegazovoe delo*, 2016, No. 3, pp. 322–336.

5. *Grabel'nikov A.S.* Sravnitel'nyj analiz sushhestvujushhih metodik prognozirovanija chrezvychajnyh situacij tehnogennogo haraktera (Comparative analysis of existing methods for forecasting emergency situations of a technogenic nature). *Sovremennye problemy grazhdanskoj zashhity*, 2022, Vol. 1 (42), pp. 10–13.

6. *Melikova M.T.* Metody prognozirovanija riskov tehnogennyh chrezvychajnyh situacij (Methods for predicting the risks of technogenic emergencies). *Dostizhenija nauki i obrazovanija*, 2018, Vol. 8(30), pp. 21–23.

7. *Vereskun A.V., Fajzulin T.Sh., Oltjan I.Ju., Bajda S.E., Zinov'ev S.V., Baryshev E.M., Baler M.A., and Bulgakova E.Ju.* Kompleksnoe issledovanie vlijanija riskov prirodnyh i tehnogennyh chrezvychajnyh situacij na bezopasnost' zhiznedejatel'nosti naselenija Respubliki Krym i g. Sevastopolja (A comprehensive study of the impact of the risks of natural and man-made emergencies on the life safety of the population of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol). Moscow: VNII GOChS (FC), 2015, 208 p.

8. https://sev.gov.ru/docs/250/126590 (July 11, 2022).

9. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173907 (July 11, 2022).

10. https://sev.gov.ru/docs/253/29190 (July 11, 2022).

11. http://stat.gibdd.ru (July 11, 2022).

12. Gorod Sevastopol' v cifrah 2021 g., 2022, 199 p.

13. https://internet-law.ru/gosts/gost/62126 (July 11, 2022).

УДК 621.43.052 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-62-68

АНАЛИЗ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А.Г. Клименко, А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеенко

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: kag1958776@gmail.com

Проанализированы основные схемные решения когенерационных установок на базе газотурбинных двигателей и двигателей внутреннего сгорания, предложено новое схемное решение – установка на системе газовыпуска двигателя внутреннего сгорания турбокомпрессорного утилизатора, состоящего из турбины перерасширения, котла-утилизатора и дожимающего компрессора, который преобразует установку в когенерационную. Выполненные предварительные расчеты показали, что схемное решение с установленным турбокомпрессорным утилизатором является перспективным и приводит к повышению энергетической и экологической эффективности когенерационной установки на базе ДВС.

Ключевые слова: когенерация, энергетика, двигатель внутреннего сгорания, газовый двигатель, эффективные характеристики, экологические характеристики, турбокомпрессорный утилизатор

Поступила в редакцию: 29.08.2022. После доработки: 15.09.2022.

Введение. В современном двигателестроении остаются актуальными исследования по повышению технологической, энергетической и экологической эффективности двигателей внутреннего сгорания. Настоящее исследование относится к двигателям внутреннего сгорания (ДВС), к которым согласно [1] относятся ДВС с принудительным воспламенением (цикл Отто), с воспламенением от сжатия (дизели или ДВС, работающие по циклу Тринклера), а по виду используемого топлива – бензиновые, дизельные, газовые, газодизельные, многотопливные.

Известно достаточно много способов повышения эффективности ДВС, связанных с их форсировкой и воздействием на рабочий процесс (повышение наддува, охлаждение наддувочного воздуха, электронное регулирование топливоподачи и газораспределения, регулирование степени сжатия, применение на газовых двигателях специальных газовпускных устройств и др.) [2, 3].

Вполне очевидно, что всякое повышение эффективности ДВС связано с обеспечением полноты сгорания топлива, повышением КПД, а, следовательно, снижением доли выбросов в атмосферу отработавших газов относительно вырабатываемой мощности, т. е. при этом решается двуединая задача – повышение как топливной, так и экологической составляющей эффективности.

Учитывая, что основные статьи по вредным выбросам в атмосферу относятся к секторам электроэнергетики и транспорта [4], ниже будут рассмотрены схемные решения когенерационных установок и их влияние на эффективные и экологические характеристики ДВС. Предложена доработка газовыпускного тракта ДВС путем установки в нем турбокомпрессорного утилизатора. Важную роль в двигателестроении играют технические решения, связанные с переводом ДВС на альтернативные виды топлив (природный газ, биотопливо), что, безусловно, ведет к значительному уменьшению вредных выбросов. Изложенные выше технические предложения в настоящем исследовании будут отнесены к приоритетным в отношении ДВС.

Обзор технических решений. Первоначально использование турбокомпрессорного утилизатора было предложено исследователями в газотурбинных

двигателях [5, 6]. Изначально предлагалось газотурбинные двигатели объединять с утилизатором теплоты уходящих газов в когенерационную установку с использованием охладителя выхлопных газов в качестве котла-утилизатора КУ (рис. 1).

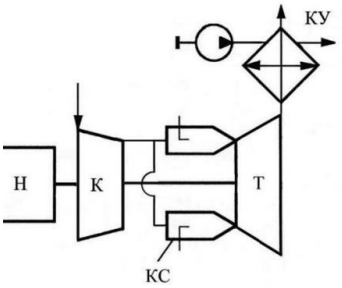


Рис. 1. Схема когенерационной ГТУ:
К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; Н – нагрузка; КУ – котел утилизатор
Fig 1. Schematic of a gas turbine cogeneration plant:
K – compressor; KC – combustion chamber; T – turbine; H – load; КУ – recovery boiler

Предложенное техническое решение нашло свое дальнейшее развитие в связи с его перспективностью, так как способ повышения эффективности ГТД с использованием котла-утилизатора может быть дополнено установкой турбины перерасширения (ТП) и дожимающего компрессора (ДК) (рис. 2), что в совокупности (цикл Брайтона совместно с турбиной перерасширения) позволяет повысить удельную мощность установки на 30%.

Исследования [6] показали, что при степени повышения давления $\pi_к$ = 5…7 эффективный КПД газотурбинного двигателя, оснащенного турбокомпрессорным утилизатором, достигает значений η_e = 43…46% при начальной температуре газа T_3 = 1473…1573 К и степени регенерации σ = 0,80…0,85.

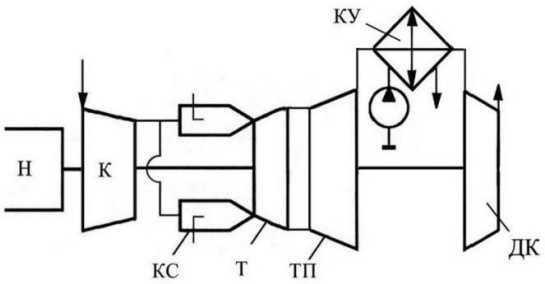


Рис. 2. Схема когенерационной ГТУ с турбокомпрессорным утилизатором:
К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; ТП – турбина перерасширения;
ДК – дожимающий компрессор; Н – нагрузка; КУ – котел утилизатор
Fig 2. Schematic of a gas turbine cogeneration plant unit with a turbocharger utilizer:
K – compressor; KC – combustion chamber; T – turbine; ТП – overexpansion turbine;
ДК – booster compressor; H – load; КУ – recovery boiler

Применение всех типов ДВС в составе когенерационных установок нашло свое практическое применение в современном производстве как в нашей стране, так и в мире, и развивается достаточно быстрыми темпами. Для анализа схемных решений когенерационных установок на базе газопоршневых ДВС (ГПД) воспользуемся исследованием [7].

На рис. 3 представлена схема когенерационной установки производства фирм: FG WILSON (Великобритания) типа PG1250B; GE Jenbacher (Австрия) типа Jenbacher JMS320; DEUTZ AG (Германия) типа DEUTZ TBG620V12K;

Tedom (Чехия) типа Caterpillar G3516; ОАО Первомайскдизельмаш (РФ) типа ДвГА-630 (к сожалению, отечественный производитель не производит ГПД мощностью свыше 1 МВт). Особо следует отметить, что типа Caterpillar G3516 успешно работает на ОАО «Завод Фиолент». Перечисленные установки имеют мощность примерно 1 МВт, а отечественная – 630 кВт. Когенерационные установки перечисленных фирм могут работать по представленной схеме. Отработавшие газы не выбрасываются в атмосферу с безвозвратными потерями тепла, а проходят через котел-утилизатор КУ, частично могут перепускаться через утилизационный теплообменник Т. В КУ тепловая энергия газов используется для подогрева воды и подачи ее потребителю тепловой энергии П.

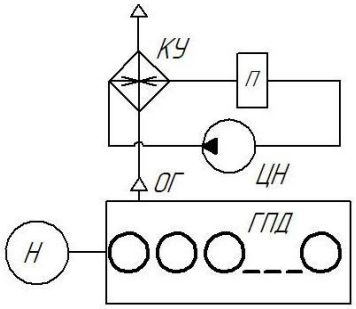


Рис. 3. Схема когенерационной установки ГПД с котлом-утилизатором:
Н – нагрузка; ГПД – газопоршневой двигатель; ОГ – отработавшие газы;
КУ – котел-утилизатор; П – потребитель тепла; ЦН – циркуляционный насос
Fig. 3. Diagram of GPE cogeneration plant with recovery boiler:
Н – load; ГПД – gas piston engine; ОГ – exhaust gases; КУ – recovery boiler;
П – heat consumer; ЦН – circulation pump

Представленное схемное решение может быть дополнено системой утилизации теплоты, выделившейся при охлаждении наддувочного воздуха для целей, например, горячего водоснабжения (на схеме не показана).

Производителями по требованию заказчика может быть применена схема когенерационной установки на базе ДВС, парового котла и конденсационной турбины (рис. 4).

Представленная на рис. 4 схема мультигенерационной установки широко используется сегодня на объектах малой генерации как высокоэффективная, с точки зрения высокоэффективного использования теплоты сгорания топлива.

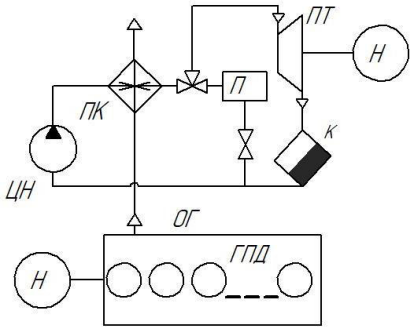


Рис. 4. Схема когенерационной установки ГПД с паровым котлом и паровой турбиной:
Н – нагрузка; ГПД – газопоршневой двигатель; ОГ – отработавшие газы; ЦН – циркуляционный насос; ПК – паровой котел; П – потребитель; ПТ – паровая турбина; К – конденсатор
Fig. 4. Diagram of GPE cogeneration plant with recovery boiler and steam turbine: Н – load;
ГПД – gas piston engine; ОГ – exhaust gases; ЦН – circulation pump; ПК – steam boiler;
П – heat consumer; ПТ – steam turbine; К – condenser

Однако следуя анализу, представленному в [8], необходимо отметить, что в стремлении повысить энергоэффективность из анализируемых схем наиболее актуальной является схема на рис. 3, с коэффициентом использования тепла (КИТ) выше 93%.

Реализация схемы на рис. 4 возможна как при отключении паровой турбины, тогда КИТ будет таким же, как и в схеме, представленной на рис. 3, однако при ее работе вырабатывается дополнительная мощность (может быть передана на генератор или другую нагрузку). В целом, КИТ схемы (рис. 4) зависит от времени работы на систему теплоснабжения потребителя и для средних широт составляет 60–70%.

Учитывая вышеизложенное, ниже предлагается схема (рис. 5), которая в настоящее время не применяется производителями мультигенерационных установок на базе ДВС, но, на наш взгляд, может быть применена как перспективная в сфере малой энергетики.

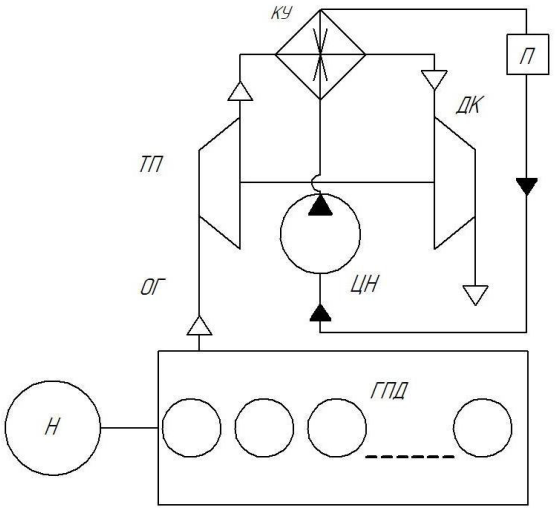


Рис. 5. Схема когенерационной установки ГПД с турбокомпрессорным утилизатором:
Н – нагрузка; ГПД – газопоршневой двигатель; ОГ – отработавшие газы;
ТП – турбина перерасширения; КУ – котел-утилизатор; П – потребитель;
ДК – дожимающий компрессор; ЦН – циркуляционный насос
Fig. 5. Diagram of GPE cogeneration plant with a turbocharger utilize:
Н – load; ГПД – gas piston engine; ОГ – exhaust gases; ТП – overexpansion turbine;
КУ – steam boiler; П – heat consumer; ДК – booster compressor; ЦН – circulation pump

Предложенное усложнение цикла ДВС можно произвести нетрадиционным способом путем применения турбокомпрессорного утилизатора, газовыпуске, состоящего из турбины перерасширения, котла-утилизатора и дожимающего компрессора, что, в свою очередь, позволит получить дополнительную работу, что приведет к повышению КПД и удельной мощности двигателя [6]. Учитывая высокий КПД котла-утилизатора и незначительные затраты мощности на привод ДК (давление на выходе из ТП будет ниже атмосферного), ожидаемый относительный прирост эффективности составит 10–15%.

Эффективные и экологические показатели. В табл. 1 показаны результаты сравнительного анализа эффективных показателей работы когенерационной установки промышленного образца типа Caterpillar G3516, оснащенной системами электронного управления газовыпуском топливоподачей и образца с установленным турбокомпрессорным утилизатором.

Применение электронных систем управления фазами газораспределения

позволяет легко изменять углы опережения клапанов. Уменьшение угла опережения открытия выпускного клапана позволяет увеличить фазу расширения рабочих газов и повысить полезную мощность двигателя при том же расходе топлива. Кроме того, это приводит к улучшению качества очистки цилиндров ДВС и снижению коэффициента остаточных газов. Снижение коэффициента остаточных газов способствует не только повышению качества внутрицилиндровых процессов наполнения, сжатия, сгорания, но и снижению вредных выбросов. Установка на выхлопе турбокомпрессорного утилизатора обеспечивает удаление рабочих газов из цилиндра, а также утилизацию их теплоты. Расчет параметров производился по методике [9, 10]. Из таблицы видим, что по расчетным данным эффективность ДВС по коэффициенту использования тепла с установленным на газовыпускной системе турбокомпрессорным утилизатором на 6,4% выше, чем у промышленного образца. Это связано, прежде всего, с тем, что при включении в систему газовыпуска турбокомпрессорного утилизатора, возрастает степень последующего расширения на такте выпуска. Рост этого параметра, в свою очередь, приводит к улучшению качества очистки цилиндров ДВС и снижению коэффициента остаточных газов. Снижение коэффициента остаточных газов способствует не только повышению качества внутрицилиндровых процессов наполнения, сжатия, сгорания, но и снижению вредных выбросов.

Таблица 1. Эффективные показатели работы когенерационной установки промышленного образца типа Caterpillar G3516 и образца с установленным турбокомпрессорным утилизатором

Наименование параметра	Прототип	Образец с турбиной перерасширения	Разница (абс/%)
Расход топлива при 100% нагрузке, нм^3/ч	297	297	0/0
Мощность, кВт	1030	1059	29/2,81
КПД, %	35,5	36,5	1/2,81
Удельный расход газа, нм^3/кВт·ч	0,285	0,277	-0,008/2,81

Анализ расчетных данных свидетельствует о том, что при незначительном Снижении одном и том же расходе топлива прирост мощности и, соответственно, КПД установки с турбокомпрессорным утилизатором получается достаточно ощутимым – 2,81% без учета выработки тепловой энергии, что является предметом дальнейших исследований. Следовательно, можно констатировать снижение количества выпускных газов относительно значения прироста мощности и значительное повышение экологической эффективности.

Выводы. Анализ схемных решений когенерационных установок на базе ДВС показал целесообразность их использования на объектах малой генерации и транспорта.

В качестве перспективного направления в развитии когенерации на базе ДВС можно выделить направление, связанное с установкой после системы газовыпуска турбокомпрессорного утилизатора, способствующего как улучшению качества протекания рабочего процесса ДВС, так и значительному сокращению вредных выбросов в атмосферу относительно вырабатываемой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ГОСТ* 10150-2014. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2015.

2. *Поляков А.П., Мариянко Б.С.* Исследование влияния на показатели газодизеля усовершенствования системы питания применением газовпускного устройства // Научные труды Винницкого национального технического университета. 2014. № 2. С. 10.

3. *Кулешов А.С.* Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС: Дис. … д-ра техн. наук (спец. 05.04.02). М., 2012. 235 с.

4. *Клименко А.Г., Очеретяный В.А.* Правовые, экологические аспекты и особенности декарбонизации энергетики и транспорта в Российской Федерации // Системы контроля окружающей среды. 2022. № 2(48). С. 61–72.

5. *Матвеенко В.Т., Очеретяный В.А.*, *Андриец А.Г.* Перспективы повышения эффективности ГТД с регенерацией теплоты усложнением цикла // Вестник СевНТУ: сб. науч. трудов. Севастополь. 2010. Вып. 106. С. 120–123.

6. *Матвеенко В.Т., Дологлонян А.В., Клименко А.Г., Очеретяный В.А.* Работа электротеплогенерирующих газотурбинных установок сложных циклов на номинальных и переменных режимах // Национальная Ассоциация Ученых. 2021. № 64-2(64). С. 17–22.

7. *Басок Б.И., Коломейко Д.А.* Анализ когенерационных установок. Ч. II. Анализ энергетической эффективности // Промышленная теплотехника. 2006. № 4. С. 79–83.

8. *Басок Б.И., Коломейко Д.А.* Анализ когенерационных установок. Ч. III. Анализ схемных решений когенерационных установок // Промышленная теплотехника. 2006. № 5. С. 76–82.

9. *Оганесян Л.С., Саргсян А.Г.* Показатели энергетической эффективности когенерационных и тригенерационных установок // Вестник Национального политехнического университета Армении. Электротехника, энергетика. 2016. № 1. С. 67–77.

10. *Клименко А.Г.* Контроль параметров процесса наполнения газопоршневого двигателя методом малых отклонений // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 3 (41). С. 49–55.

ANALYSIS OF CIRCUIT SOLUTIONS OF COGENERATION PLANTS BASED ON INTERNAL COMBUSTION ENGINES AND THEIR INFLUENCE ON EFFICIENT AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

A.G. Klimenko, A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko

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

The main circuit solutions of cogeneration plants based on gas turbine engines and internal combustion engines are analyzed, a new circuit solution is proposed - installation on the gas outlet system of the internal combustion engine of a turbocharger heat exchanger as part of an overexpansion turbine, a waste heat boiler and a booster compressor, which converts the unit into a cogeneration unit. Preliminary calculations have shown that the circuit solution with the installed turbocharger utilizer is promising and leads to an increase in the energy and environmental efficiency of the cogeneration plant based on ICE.

Keywords: cogeneration, energy, internal combustion engine, gas engine, efficient characteristics, environmental characteristics, of turbocharger utilize

REFERENCES

1. *GOST 10150-2014*. Dvigateli vnutrennego sgoranija porshnevye. Obshhie tehnicheskie uslovija (Internal combustion piston engines. General specifications), Moskow: Standartinform, 2015.

2. *Poljakov A.P. and Marijanko B.S.* Issledovanie vlijanija na pokazateli gazodizelja usovershenstvovanija sistemy pitanija primeneniem gazovpusknogo ustrojstva (Study of the impact on gas diesel performance of the power supply system improvement using the gas inlet device). *Nauchnye trudy Vinnickogo nacional'nogo tehnicheskogo universiteta*, 2014, No. 2, p. 10.

3. *Kuleshov A.S.* Razvitie metodov rascheta i optimizacija rabochih processov DVS: Dis. d-ra tekhn. nauk (Development of methods of calculation and optimization of internal combustion engine operating processes). Dr. tech. sci. thesis, Moscow, 2012, 235 p.

4. *Klimenko A.G. and Ocheretjanyj V.A.* Pravovye, jekologicheskie aspekty i osobennosti dekarbonizacii jenergetiki i transporta v Rossijskoj Federacii (Legal, environmental aspects and features of decarbonizationof energy and transport in the Russian Federation). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2022, No. 2 (48), pp. 61–72.

5. *Matveenko V.T., Ocheretjanyj V.A., and Andriec A.G.* Perspektivy povyshenija jeffektivnosti GTD s regeneraciej teploty uslozhneniem cikla (Prospects for Improving the efficiency of gas turbine engines with heat recovery by complicating the cycle). *Vestnik SevNTU*. Collection of scientific works, Sevastopol, 2010, Issue 106, pp. 120–123.

6. *Matveenko V.T., Dologlonjan A.V., Klimenko A.G., and Ocheretjanyj V.A.* Rabota jelektroteplogenerirujushhih gazoturbinnyh ustanovok slozhnyh ciklov na nominal'nyh i peremennyh rezhimah (Operation of electric and heat generating gas turbine plants of complex cycles in nominal and alternating modes). *Nacional'naja Associacija Uchenyh*, 2021, No. 64-2(64), pp. 17–22.

7. *Basok B.I. and Kolomejko D.A.* Analiz kogeneracionnyh ustanovok. Chast II. Analiz jenergeticheskoj jeffektivnosti (Analysis of cogeneration plants. Part II. Analysis of energy efficiency). *Promyshlennaja teplotehnika*, 2006, No. 4, pp. 79–83.

8. *Basok B.I. and Kolomejko D.A.* Analiz kogeneracionnyh ustanovok. Chast III. Analiz shemnyh reshenij kogeneracionnyh ustanovok (Analysis of cogeneration plants. Part III. Analysis of schematic solutions for cogeneration plants). *Promyshlennaja teplotehnika*, 2006, No. 5, pp. 76–82.

9. *Oganesjan L.S. and Sargsjan A.G.* Pokazateli jenergeticheskoj jeffektivnosti kogeneracionnyh i trigeneracionnyh ustanovok (Energy efficiency indicators of cogeneration and trigeneration plants). *Vestnik nacional'nogo politehnicheskogo universiteta Armenii. Jelektrotehnika, jenergetika*, 2016, No. 1, pp. 67–77.

10. *Klimenko A.G.* Kontrol' parametrov processa napolnenija gazoporshnevogo dvigatelja metodom malyh otklonenij (Control of parameters of an intake stroke of a gas piston engines using method of small deviations). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2020, No. 3 (41), pp. 49–55.

УДК 551.46.06 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-69-78

КОНТРОЛЬ БАЛАНСА НАНОСОВ НА УЧАСТКЕ МОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ И ВЛИЯНИЕ РАБОТЫ СКВОЗНЫХ БЕРЕГОЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА БЕРЕГ

А.Е. Щодро[1], А.Н. Сорокин[2]

[1]Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: alexeugn@ya.ru
[2]2198 НИЦ МО Российской Федерации, г. Севастополь
vip.parfyan@mail.ru

Представлены некоторые методические основы расчётов притока наносов к пляжному берегу, внутреннего баланса наносов на определённом его участке, изменения его конфигурации во времени и динамики береговой линии. Методика определения расхода наносов, поступающих из открытого моря, основана на работах Леонтьева И.О., в которых учитываются морфологические свойства берега и другие реальные условия. Расходы наносов связываются с вероятностями сдвига отдельных частиц с поверхности грунта.
Ключевые слова: контроль береговых деформаций, вероятность отрыва частицы, расход наносов, донная скорость

Поступила в редакцию: 15.08.2022. После доработки: 30.08.2022.

Введение. Очень актуальной является в настоящее время тема динамики морских берегов и пляжей, связанной тесно с изменением климатических условий, активизации геоморфологических процессов и учащением природных катаклизмов. Для разработки системы получения оперативной информации излагаются некоторые теоретические концепции. Подготавливается объект, где производится попытка искусственными мероприятиями уменьшить энергию волновых возмущений, воздействующих на берег, и привлечь наносы к пляжной территории. На этом же объекте собираются данные по накоплению наносов. Такая идея была уже высказана в работе [1].

Цель работы:

- разработка системы оценочных измерений для постоянного сбора и накопления информации по кинематике придонных течений ветроволнового потока, плотностях, расходах наносов, направлении их движения. Дальнейшее их накопление, обобщение и разработка предложений по контролю за динамикой пляжей;
- приспособление как теоретического аппарата, изучающего расходы при донных наносах, так и методов измерения, применяемых к условиям ветроволнового потока прибрежной области;
- подготовка данных для апробации этой системы на конкретном натурном объекте.

Основы связи придонных скоростей и придонных касательных напряжений с вероятностью сдвига частицы. Идеи Эйнштейна Х.А. [2, 3], развивались Гришаниным К.В. [2], давшим подробное описание теоретических разработок Эйнштейна Х.А. со своими комментариями. Идеи Эйнштейна Х.А. и Гришанина К.В. развивались и разрабатывались также в Институте гидромеханики АН Украины: авторы Розовский И.Л., Базилевич В.А. разработали систему зависимостей для определения расхода наносов через табличные значения некоторых специальных функций (интегралов вероятности, функции ошибок).

Эйнштейном Х.А. [3] установлена связь между кинематикой потока и вероятностью сдвига частиц, лежащих на дне. На основании этой связи разработа-

ны эмпирические формулы, позволяющие определять удельный расход наносов. Так, для произвольного (необязательно равномерного) или квазиравномерного потока Эйнштейном получена теоретическая формула:

$$P = 1 - 0{,}5\left[\operatorname{erf}\left(\frac{T-1}{0{,}5}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{-T-1}{0{,}5}\right)\right], \quad (1)$$

где P – вероятность отрыва наносной частицы со дна; $T = 2\left(\frac{U_0}{U}\right)^2 = \frac{\tau_{крит}}{\tau}$ – отношение критических напряжений на дне $\tau_{крит}$ к реальному напряжению τ в заданной точке дна; выражается также как отношение квадратов скоростей – критической U_0 и реальной U (придонная динамическая скорость для русла); erf(x) – стандартизированная табличная функция ошибок

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2} dt. \quad (2)$$

Для квазиравномерного потока могут быть приняты соотношения

$$\tau_{крит} = \rho U_0^2, \; U_0 = 0{,}189\sqrt{\rho' g d_{сер}},$$

где ρ' – относительная плотность грунтовых частиц $\rho' = \frac{\rho_ч - \rho_0}{\rho_0}$.

Одно из эмпирических соотношений Эйнштейна Х.А. для удельного расхода i-ой фракции наносов в квазиравномерном потоке имеет вид:

$$q_i^{/} = 2{,}17\rho_1 \omega \exp(-0{,}39\psi),$$

где ρ_1 – плотность частицы. Оно связывает расход наносов с параметром подвижности наносов $\psi = \frac{d}{HI}$, который зависит, в свою очередь, от вероятности их сдвига.

U^2 – квадрат динамической скорости для русла

$$U^2 = \frac{\tau}{\rho} = gHJ, \quad (3)$$

где τ – касательные напряжения на поверхности дна русла; J и H – продольный уклон и глубина русла;

U_0 – критическая динамическая скорость, то есть начальная скорость, при которой происходят первые движения грунтовых частиц в русле.

Расходы наносов разнозернистого грунта q_H по отдельным фракциям вычисляются путем пропорционального разделения общего расхода, найденного по среднему диаметру,

$$q_{Hi} = \frac{q_i}{\sum q_i} q_i', \quad (4)$$

где i – номер фракции грунтовой смеси.

w – гидравлическая крупность наносов, которая для частиц размером более полутора миллиметров определяется по формуле

$$w = \sqrt{\frac{0{,}75\rho' g d}{C_x}}, \quad (5)$$

где C_x = 1,17 – коэффициент обтекания грунтовой частицы при ее свободном падении в неограниченной водной среде.

Процесс деформации несвязного грунта осуществляется путем отрыва и выноса отдельных его частиц, лежащих на поверхности, а также путем смыва слоя частиц толщиной, измеряемой одним – двумя или несколькими их средними диаметрами. Такая потеря устойчивости одного слоя частиц происходит обычно при наличии относительно однородного по крупности грунта и связана с нарушением баланса сдвигающих и удерживающих сил, действующих по контакту сдвигаемого слоя с более глубоко залегающими слоями частиц. Такие процессы сдвига и выноса грунта характерны для однородных грунтов. Формирующийся при деформации грунта расход наносов связан, безусловно, с веро-

ятностью сдвига отдельной частицы; и эта связь, в общих чертах, нами установлена. Именно определение вероятности отрыва становится главной задачей, так как в разных условиях волнения на море и наката на берег легче исходить из нагрузок, действующих на отдельные частицы. Этой цели могут прекрасно служить работы, посвященные основам теории отрыва отдельной частицы.

Необходимость измерения расходов наносов в том случае, если при массовом сдвиге твёрдых частиц значения вероятностей сдвига будут в действительности искажены, то есть будут не соответствовать теории, результаты определения функции касательных напряжений очень чёткие, но позволяют также вести их коррекцию через коррекцию значений касательных напряжений.

Определение вероятности сдвига одиночной частицы методом имитационного моделирования. К вероятности сдвига отдельной частицы подойдём с другой стороны. В работах [4, 5] развита теория, которая позволяет оценить вероятность сдвига частицы непосредственно из динамических факторов, влияющих на саму частицу. В дальнейшем рассматриваются условия нарушения равновесия отдельной частицы на поверхности дна. Основными факторами, определяющими условия отрыва такой частицы от дна, являются действующие на нее внешние нагрузки, а также силы инерции, связанные с ускорением частицы в начальный период ее движения. В качестве внешних нагрузок рассматриваются силы собственного веса, взвешивающая архимедова сила, а также гидродинамическая сила взаимодействия турбулентного потока с неподвижной частицей. Для частиц крупностью меньше 1,5 мм могут быть учтены также молекулярные силы, удерживающие частицу от сдвига и отрыва.

Рассматриваются три возможных варианта отрыва частицы от дна. Первый – вертикальный отрыв, когда сумма вертикальных подъемных сил, действующих на частицу, становится больше суммы сил тяжести и вертикальной составляющей силы трения $Fy(t) >= 0$. Второй – вращения частицы вокруг точки O1 и ее отрыв от точки соприкосновения в момент, когда реакция сопротивления $R(t) <= 0$ становится равной нулю. Третий вариант – перекатывание донной частицы через соседнюю частицу и дальнейшее ее движение в форме перекатывания. Из проведенных ранее расчётов следует, что наиболее частым является именно третий вариант.

Вероятности выброса частиц определяются путем решения полной системы дифференциальных уравнений, описывающих начальную стадию их движения. При этом частица считается оторвавшейся от дна, если время отрыва меньше или равно времени воздействия. На рис. 1 представлена схема силовых воздействий на одиночную шарообразную частицу, лежащую на поверхности дна и обтекаемую потоком. Нормальные и касательные силы, действующие на частицу, распределены неравномерно. Замеры силовых нагрузок производились также в работе [6].

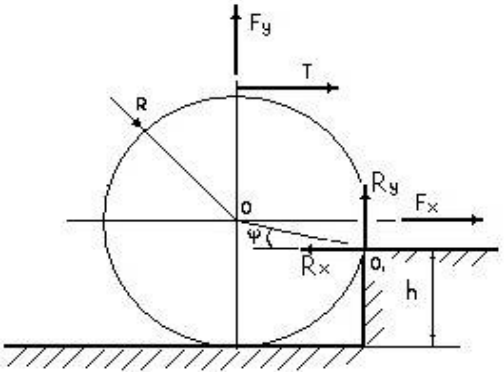


Рис. 1. Силы, действующие на одиночную шарообразную частицу
Fig. 1. Forces acting on a single spherical particle

Результирующая нормальных сил P воздействия потока на частицу может быть выражена интегралом по поверхности частицы:

$$P = \int_s p ds , \qquad (6)$$

где ds – элементарная поверхность частицы.

Горизонтальную и вертикальную составляющие силы P обозначим P_x и P_y.

Пусть $G = 3/4\,\pi\rho_4 g R^3$, $F_{apx} = 3/4\,\pi\rho g R^3$ – сила собственного веса и архимедова сила соответственно, $T = -\int_s \mu \frac{\partial u}{\partial n} ds$ – результирующая сила касательных напряжений.

Уравнения начального движения частицы. Для системы координат, обозначенной на рис. 1, запишем уравнение динамического равновесия частиц с учетом сил инерции, включаемых по принципу Д'Аламбера в систему уравновешенных сил

$$m \cdot \ddot{x}_0 = F_x(t), \qquad (7)$$

$$m \cdot \ddot{y}_0 = F_y(t), \qquad (8)$$

$$x_c(x,y)\big|_{t=0} = x_0 ,\ y_c(x,y)\big|_{t=0} = y_0 , \qquad (9)$$

$$x'_c\big|_{t=0} = 0 ,\ y'_c\big|_{t=0} = 0 , \qquad (10)$$

$$\varphi''_t = \frac{1}{I}\sum_{i=1}^{n} M_i(t), \qquad (11)$$

$$\varphi\big|_{t=0} = \varphi_0 ;\ \varphi''_t\big|_{t=0} = 0 , \qquad (12)$$

где x_c, y_c – координаты центра масс частицы, $m = \left(\rho_4 + \frac{\rho}{2}\right) 3/4\,\pi R^3$ – масса частицы с учетом присоединенной массы воды, x_0, y_0, φ_0 – декартовы координаты центра масс и его начальная угловая координата в момент времени t=0; F_x, F_y – проекции равнодействующих всех действующих сил на оси OX и OY соответственно; I – момент инерции шарообразной частицы относительно оси, проходящей через точку касания О.

Момент инерции определяется для центральной оси шарообразного тела следующим образом $I = \iint_v r^2 dm = \pi\rho_4 R^5$.

Применяя теорему Штейнера о переносе оси, получим выражение для момента инерции относительно оси, проходящей через точку O_1

$$I = \frac{28}{15}\pi\rho_4 R^5 .$$

Уравнения (7)–(12) выражают второй закон Ньютона для начального момента движения частицы. Причем уравнение (11) характеризует вращательное движение частицы вокруг оси О.

Таблица 1. Значения критических скоростей выкатывания или отрыва шарообразных частиц при $h_{уст}/D$ = 1/3 и синусоидальном характере изменения придонной скорости частицы $V(t) = V+Ksg\cdot 10\pi t$ [4, 5]

D, м	V_o, м/с при Ksg, равном		
	0,1	0,2	0,3
0,0002	0,078	0,064	0,056
0,001	0,176	0,147	0,126
0,002	0,249	0,208	0,178
0,0025	0,279	0,232	0,201
0,005	0,399	0,335	0,289
0,01	0,571	0,485	0,42
0,03	1,05	0,876	0,767
0,05	1,343	1,16	1,02
0,075	1,656	1,453	1,281
0,1	1,932	1,704	1,507
0,125	2,177	1,928	1,708
0,15	2,4	2,132	1,891
0,2	2,797	2,496	2,218

Примечание. Значения V_o получены расчетом по приведенной методике без привлечения метода статистической имитации изменения скоростей и свойств грунта.

Система наблюдений включает геодезические замеры отметок отмели в зоне накопления наносов, а также во всех участках занесения и заиления водных пространств на прибрежных территориях; замеры скоростей движения переменных во времени донных токов, их насыщенность наносами, характера движения и траектории придонных частиц, их концентраций и направления движения.

Расчёт деформации дна в пределах пляжной отмели и самого пляжа. В качестве базового уравнения расчета плановых деформаций принято двухмерное уравнение баланса наносов, которое устанавливает связь между

изменениями поверхности пляжа и транспортировкой наносов и может быть записано в виде:

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} + \frac{1}{1-\varepsilon}\frac{\partial q_{x1}}{\partial x_1} + \frac{1}{1-\varepsilon}\frac{\partial q_{x2}}{\partial x_2} = 0, \quad (13)$$

где z_0 – отметки поверхности дна речного русла; q_{x1}, q_{x2} – составляющие вектора удельного расхода русловых наносов; ε – коэффициент пористости донных отложений; x_1, x_2 – продольная и поперечные координаты.

Данное уравнение представляет собой нелинейное уравнение первого порядка гиперболического типа. Его решение удобно производить одним из известных численных методов.

Подготовка данных для апробации этой системы на конкретном натурном объекте. Вблизи г. Калининграда, в прибрежной зоне, была установлена система продольных волногасящих сквозных сооружений типа «Гребёнка», описанных в работе [7].

Описание объекта участка побережья моря вблизи г. Светловодска Калининградской обл.: уклон дна и конфигурация пляжа соответствует классическому профилю, описанному в работе [8] для аналогичных балтийских берегов. Ряд гребёнок установлен на расстоянии 35–40 м от уреза воды; использованы трубы стекло-базальтопластиковые диаметром 25 см, с расстоянием между ними 25 см. Глубина моря в месте установки гребёнок 2,2 м. За период с 2021 по 2022 гг. отложения наносов в центре участка между береговой линией и линией сооружений выросло по высоте от нуля до 1 м при общей длине трёх секций гребёнки 30 м, ширина зоны занесения песком берега составляет около 80 м.

По результатам наблюдений, проводившихся в течение двух лет, уже можно сделать выводы: первый – это систематический намыв песчаного материала на пляжную отмель напротив системы сооружений (рис. 2 а, б); второй – хорошая степень волногашения, что подтверждается фотографиями на рис. 3 а, б;

Перспективы дальнейшего развития основных идей данной работы. В работе [9] оценка размывающей способности потока, а, следовательно, и вероятности сдвига частицы, даётся по такой кинематической характеристике потока, как придонная актуальная скорость однопроцентной обеспеченности. Для волнового потока едва ли может быть применён такой способ.

Работы [8, 10, 11] служат основой для расчёта и прогноза деформации берега и эволюции береговой линии на длительные промежутки времени, измеряемые десятилетиями. Сбор информации, который можно проводить в рамках разрабатываемой концепции, может служить дополнением и уточнением тех прогнозов, которые могут даваться на основе этих работ. Работы [12–15] представляют собой различные модели двухфазных потоков не очень высокой концентрации, которые различным образом задают соотношение дефицита скорости насосных частиц по сравнению со скоростью частицы воды в тех же точках, где находятся сами частицы для разных по крупности частиц. Для выбора наиболее правильной математической модели двухфазного потока могут помочь данные измерения скорости двухфазных потоков (воды и наносов, переносимых в условиях волнового потока) средней концентрации. В зависимости от инерционности частиц будет зависеть их ускорение, которое можно фиксировать измерительными средствами (PIV-методом [1]). В работе [16] даётся физически понятная методика расчёта размывов с учётом взаимодействия наносов малой и средней концентрации, взаимодействующих с потоком и между собою. Фрагментарное применение такой модели для корректировки, исправления расчетов, выполняемых по другим моделям, могут уточнить модель взаимодействия потока и наносов для оценочных измерений насыщенности потоков и прогнозов.

Осуществление измерений в шторм представляет собой проблему, поэтому измерения целесообразно проводить при относительно слабом волнении, а затем каким-то образом обобщать результаты на случаи более мощных штормов.



а) б)

Рис. 2 а, б. Замыв участка пляжа напротив установленных гребёнок
Fig. 2 a, b. Washing out a section of the beach opposite the installed combs



а) б)

Рис. 3 а, б. Эффективность волногашения установленными сооружениями
Fig. 3a, b. Efficiency of wave damping by installed facilities



а) б)

Рис. 4 а, б. Замеры параметров наносных отложений на пляжной территории
Fig. 4 a, b. Measurements of the parameters of alluvial deposits on the beach area



а)



б)



в)

Рис. 5 а, б, в. Участки береговых отложений с отмеченными значениями глубин в метрах
Fig. 5 a, b, **c**. Areas of coastal sediments with marked depth values in meters

Заключение. Приведённые теоретические концепции расхода наносов, в зависимости от кинематических характеристик ветроволнового потока, в сочетании с приводимыми методиками натурных измерений, позволили создать основу для долговременного или оперативного сбора информация о поступающих наносах, изменения их расхода в зависимости от волновой обстановки в данном регионе, долгосрочных изменений во времени с целью разработки долговременных прогнозов динамики побережья в данном месте. Использование продольных волноломов в качестве берегозащитных систем показало их эффективность, хорошую степень волнозащиты, волногашения и значительную заносимость пляжной зоны за установленными сооружениями данного типа.

Информация на рис. 4 и 5 имеет оценочное значение. Это, к сожалению, пока что не законченное исследование, но начальные результаты свидетельствуют о хорошей заносимости пространства между берегом и сооружениями в условиях штормов слабой и средней силы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антоненков Д.А., Щодро А.Е.* Контроль и методика моделирования гидрологических процессов при проектировании гидротехнических сооружений в устьевых взморьях рек // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 4 (46). С. 55–62.

2. *Гришанин К.В*. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 311 с.

3. *Einstein Hans Albert.* Innovation and Compromise in Formulating Sediment Transport in Rivers // Journal of Hydraulic Engineering. 2004. Vol. 130 (6). P. 477–487.

4. *Schodro A.E.* Mathematical modeling of the single bottom particle stability // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: науково-технічний збірник НТУ. 2004. Вып. 71. С. 206–215.

5. *Antonenkov D.A., Shchodro A.E.* Using the PIV Method to Study the Structure of the Water Flow and Bottom Sediment Transport Process // Oceanology. 2021. Vol. 61 (6). P. 1064–1071.

6. *Мацея А.В*. Взаимодействие турбулентного потока с шероховатым дном. Вопросы теории и практики надёжности гидромелиоративных систем и сооружений. Тбилиси: ГрузНИИГиМ., 1989. С. 106–112.

7. *Щодро А.Е., Сорокин А.Н.* Принципы управления движением наносов с помощью проницаемых волногасящих сооружений с гибкими элементами // Опасные явления – III: III Междунар. науч. конф. на базе ЮНЦ РАН (г. Ростов-на-Дону, 15–19 июня 2021 г.). С. 213–217.

8. *Леонтьев И.О.* Бюджет наносов и прогноз развития морского берега // Океанология. 2008. Т. 48 (3). С. 467–476.

9. *Базилевич В.А*. Определение размывающей способности потока по актуальным скоростям // Гидротехническое строительство. 1962. № 8. С. 39–40.

10. *Леонтьев И.О*. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: GEOS, 2001. 272 с.

11. *Леонтьев И.О.* Равновесие берегового контура // Океанология. 2005. Т. 45 (5). С. 790–800.

12. *Гришин Н.Н.* Механика придонных наносов. М.: Наука, 1982. 160 с.

13. *Баренблатт Г.И.* О движении взвешенных частиц в турбулентном потоке // Прикладная математика и механика. 1953. Т. 17 (3). С. 261–274.

14. *Франкль Ф.И.* Опыт полуэмпирической теории движения взвешенных наносов в неравномерном потоке. Избранные труды по газовой динамике. М.: Наука, 1973. С. 664–669.

15. *Славінська О.С*. Гідродинамічний опис структури придонної області турбулентного потоку з урахуванням кореляцій руху часток наносів // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. 2006. Вип. 31. С. 278–286.

16. *Савенко В.Я., Славинська О.С., Щодро О.Є*. Методика розрахунку загальних руслових деформацій біля струмененапрямних дамб та мостових переходів: МРР 218–02070915–231–2004, Киев: Укравтодор: НТУ, 2004. 83 с. (Нормативний документ Укравтодор).

SEDIMENT BALANCE CONTROL IN THE SEA COAST SECTION AND INFLUENCE OF THE WORK OF THROUGH SHORE PROTECTION CONSTRUCTIONS ON THE COAST

A.E. Shchodro[1], A.N. Sorokin[2]

[1]Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28
[2]198 SRC MD of RF, Sevastopol

Some methodological bases for calculating the sediment inflow to the beach coast, the internal balance of sediments in a certain area, changes in its configuration over time, and coastline dynamics are presented. The method for determining the discharge of sediments coming from the open sea is based on the works of Leontiev I.O., which consider morphological properties of the coast and other real conditions. Sediment flow rates are associated with the probabilities of particle separation from the bottom surface.
Keywords: control of bank deformations, probability of particle separation, sediment flow, bottom velocity

REFERENCES

1. *Antonenkov D.A.and Shchodro A.Ye*. Kontrol' i metodika modelirovaniya gidrologicheskikh protsessov pri proyektirovanii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy v ust'yevykh vzmor'yakh rek (Control and methodology for modeling hydrological processes in the design of hydrotechnical structures in the estuarine coastal areas of rivers). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2021, No. 4 (46), pp. 55–62.

2. *Grishanin K.V*. Dinamika ruslovykh potokov (Dynamics of river-bed flows). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, 311 p.

3. *Einstein Hans Albert.* Innovation and Compromise in Formulating Sediment Transport in Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, Vol. 130 (6), pp. 477–487.

4. *Schodro A.E.* Mathematical modeling of the single bottom particle stability. *Avtomobil'ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo*, Iss. 2004, 71, pp. 206–215.

5. *Antonenkov D.A, and Shchodro A.E.* Using the PIV Method to Study the Structure of the Water Flow and Bottom Sediment Transport Process. *Oceanology*, 2021, Vol. 61 (6), pp. 1064–1071.

6. *Matseya A.V.* Vzaimodeystviye turbulentnogo potoka s sherokhovatym dnom (Interaction of a turbulent flow with a rough bottom). *Voprosy teorii i praktiki nadozhnosti gidromeliorativnykh sistem i sooruzheniy*. Tbilisi: GruzNIIGiM, 1989, pp. 106–112.

7. *Shchodro A.Ye. and Sorokin A.N* Printsipy upravleniya dvizheniyem nanosov s pomoshch'yu pronitsayemykh volnogasyashchikh sooruzheniy s gibkimi elementami (Principles of control of sediment movement using permeable wave damping structures with flexible elements). III Mezh-dunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Opasnyye yavleniya – III", na baze Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk, Rostov-na-Donu, 15-19 iyunya 2021, pp. 213–217.

8. *Leont'yev I.O*. Byudzhet nanosov i prognoz razvitiya morskogo berega (Sediment budget and seashore development forecast). *Okeanologiya*, 2008, Vol. 48 (30), pp. 467–476.

9. *Bazilevich V.A*. Opredeleniye razmyvayushchey sposobnosti potoka po aktual'nym skorostyam (Determination of the erosive capacity of a current by actual speeds). *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo*, 1962, No. 8, pp. 39–40.

10. *Leont'yev I.O.* Pribrezhnaya dinamika: volny, techeniya, potoki nanosov (Coastal dynamics: waves, currents, sediment flows). Moscow: GEOS, 2001, 272 p.

11. *Leont'yev I.O*. Ravnovesiye beregovogo kontura (Equilibrium of the coastal contou). *Okeanologiya*, 2005, Vol. 45 (5), pp.790–800.

12. *Grishin N.N.* Mekhanika pridonnykh nanosov (Mechanics of bottom sediments). Moscow: Nauka, 1982, 160 p.

13. *Barenblatt G.I.* O dvizhenii vzveshennykh chastits v turbulentnom potoke (On the Motion of Suspended Particles in a Turbulent Flow). *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 1953, Vol. 17 (3), pp. 261–274.

14. *Frankl' F.I.* Opyt poluempi-richeskoy teorii dvizheniya vzveshennykh nanosov v neravnomernom potoke. (Experience of the semi-empirical theory of the movement of suspended sediments in an irregular flow). Izbrannyye trudy po gazovoy dinamike. Moscow: Nauka, 1973, pp. 664–669.

15. *Slavins'ka O.S.* Hidrodynamichnyy opys struktury prydonnoyi oblasti turbulentnoho potoku z urakhuvannyam korelyatsiy rukhu chastok nanosiv (Hydrodynamic description of the structure of the bottom region of the turbulent flow taking into account the correlations of the movement of sediment particles). *Hidromelioratsiya ta hidrotekhnichne budivnytstvo*, 2006, Vol. 31, pp. 278–286.

16. *Savenko V.YA., Slavyns'ka O.S., and Shchodro O.Ye.* Metodyka rozrakhunku zahal′nykh ruslovykh deformatsiy bilya strumenenapryamnykh damb ta mostovykh perekhodiv: MRR 218–02070915–231–2004 (Methodology for calculating general channel deformations near jet-directing dams and bridge crossings: MRR 218–02070915–231–2004). Kiev: Ukravtodor: NTU, 2004, 83 p.

УДК 004.9, 504.064.3, 504.064.4 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-79-83

МОДЕЛИРОВАНИЕ НОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ОТ ПРЕДПРИЯТИЙ-ВОДОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ПРИРОДНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСАХ

Н.А. Жильникова, А.А. Баранова, В.О. Смирнова, И.А. Шишкин

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
РФ, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: nataliazhilnikova@gmail.com

Разработана структура информационно-алгоритмического обеспечения контроля качества окружающей среды и нормирования техногенной нагрузки для предприятий-водопользователей. Предложена методика управления территориальным природно-производственным комплексом на основе геоинформационных технологий и функциональной модели нормирования допустимого воздействия производственных систем. Информационно-алгоритмическое обеспечение для формирования ГИС проектов по экологическому нормированию техногенной нагрузки предприятий территориального природно-производственного комплекса бассейна Финского залива, позволило обосновать уменьшение массы загрязняющих веществ от предприятий-водопользователей на 15–35%.
Ключевые слова: природно-производственный комплекс, геоинформационные системы, техногенная нагрузка, моделирование

Поступила в редакцию: 12.07.2022. После доработки: 16.08.2022.

Введение. Улучшение организации и планирования сложных технических систем – путь решения важнейшей задачи оптимального взаимодействия производственных систем и окружающей среды. В этой области рассматривается большая управляемая система, состоящая из совокупности сложных взаимосвязанных подсистем, объединенных общей целью взаимосвязанного и взаимозависимого функционирования с учетом заданных критериев и ограничений.

Эффективность управления территориальным природно-производственным комплексом (ТППК) связана с основополагающими принципами и обусловлена необходимостью обеспечения с одной стороны регламентированных уровней соответствия производственных процессов наилучшим доступным технологиям (НДТ), а с другой, с учетом изменений природоохранного законодательства, обеспечения экологических стандартов по нормативам допустимых воздействий (НДВ) и индивидуальных для отдельных водопользователей нормативов допустимых сбросов (НДС) в рамках бассейновых систем комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО).

Решение задач, связанных с комбинированным нормированием антропогенной нагрузки от производственных систем и контроля качества воды, требует разработки современного информационно-алгоритмического обеспечения оценки состояния водных объектов ТППК с помощью ГИС-технологий.

Методы. Геоинформационное моделирование для обоснования нормативов допустимого сброса сточных вод предприятий-водопользователей в территориальных природно-производственных комплексах. Наиболее наглядно при решении экологических задач в последние годы проявилась роль системного анализа и геоинформационного моделирования. Системный подход обусловлен новыми принципами исследования, которые ориентированы на изучение специфических характеристик сложноорганизованных объектов, таких как ТППК – совокупность предприятий, расположенных в пределах одного речного бассейна (региона), в рамках которого должны быть обеспечены нормативы качества окружающей среды [1]. Ме-

тоды геоинформационного моделирования позволяют решать комплекс задач контроля и нормирования сточных вод для обоснования разрабатываемых нормативов.

Применительно к отдельному предприятию-водопользователю в границах ТППК, для которого разрабатываются нормативы допустимого сброса сточных вод, необходимо иметь систему оперативного мониторинга водного объекта. Такой мониторинг должен использовать автоматизированные стационарные и передвижные станции контроля (АССК и АПСК). Основными задачами автоматизированного контроля загрязнения водного объекта для ТППК являются:

1) оперативный сбор и экспресс-оценка поступающей информации, анализ ее репрезентативности, изменение режима работы в зависимости от результатов, выдача отработанных данных для последующего анализа;

2) накопление, статистическая обработка и сортировка измерительной информации о загрязнении водного объекта (ЗВО), получение средних часовых, суточных, месячных, сезонных, годовых и других данных;

3) создание банка данных об источниках ЗВО, их расположении, мощности, виде и цикличности сброса сточных вод (режиме водоотведения), о наличии очистных сооружений и возможных мероприятий по краткосрочному изменению параметров очистки;

4) комплексная оценка степени опасности источников загрязнения и воздействия на них при неблагоприятных гидрометеорологических условиях;

5) оперативный прогноз степени ЗВО;

6) анализ эффективности различных схем очистки и водовыпуска в процессе эксплуатации;

7) обеспечение информацией заинтересованных организаций.

Количество и места расположения контрольно-замерных станций (КЗС) различного типа в ТППК и за его пределами должны устанавливаться на основе имитационного моделирования с использованием соответствующего типа моделей конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ (КДП и ПВ) для различных гидрологических режимов. При обосновании расположения КЗС определяющими являются профили изолиний концентраций, полученные в результате моделирования для различных сезонов года [2].

При выборе контролируемых параметров в первую очередь исходят из целей, поставленных перед конкретной системой мониторинга. При выборе комплекта измерительных электродов для той или иной станции контроля качества воды учитывается степень общности показателей.

Необходимо, чтобы на станции мониторинга выбранный интервал между измерениями был соизмерим с временем протекания изучаемого процесса. Для определения интервала времени Δt может быть использована формула [3]

$$\rho(\Delta t) = K_x \Delta t / \sigma_x^2 ,$$

где $\rho(\Delta t)$ – корреляционная функция контролируемого показателя; K_x – коэффициент изменчивости концентрации; σ_x^2 – дисперсия процесса с показателем концентрации x.

Комплекс технических средств для геоинформационного моделирования нормирования техногенной нагрузки позволяет получать достаточную информацию для схематизации процессов КДПиПВ и проводить оценку достоверности построенных моделей. Модели с заданной точностью качества элементов должны быть устойчивы по отношению к информационному шуму. Допустимая погрешность решения той или иной задачи $\varepsilon_{доп}$ задается из практических соображений в зависимости от задачи. Общая погрешность $\varepsilon_{об}$ включает погрешности выбранного метода решения задачи, погрешности работы цифрового устройства и так называемые погрешности информационного шума.

Существенно различаются требования к исходной информации в зависимости от используемых подходов и приме-

няемых моделей (детерминированных или вероятностных). В соответствии с подходом используются различные критерии достаточности информации и возможности ее агрегирования. При вероятностном подходе выявляются законы распределения общесанитарных и специфических показателей природных (до и после сброса сточных вод) и сточных вод, а также строятся функции распределения этих показателей. На основе показателей обосновываются НДС загрязняющих веществ [4].

В случае невыполнения требований к исходной информации получаемые статистические оценки и прогноз могут оказаться недостоверными. Таким образом, исходная информация является одним из основных критериев использования вероятностных или детерминированных математических моделей прогноза качества воды и обоснования НДС, а также программных средств [5].

Результаты. Структура информационно-алгоритмического обеспечения контроля качества окружающей среды и нормирования техногенной нагрузки от производственных систем в ТППК:

1. Блок моделирования КДПиПВ для неограниченного числа и типа субъектов-водопользователей ТППК.
2. База данных об объекте-водопользователе ТППК.
3. Алгоритмы создания перечня контролируемых показателей на топографической и картографической основе.
4. Система установления индикаторов и целевых показателей для имитационного моделирования.
5. База геоинформационных данных для расчета нормативов допустимого сброса.
6. Модель водного объекта бассейнового (регионального) ТППК.
7. Карты-схемы по данным имитационного моделирования.

Результаты моделирования представляются в виде набора таблиц, диаграмм, графиков и карт и используются для формирования ГИС-проекта «Экологическое нормирование для производств в ТППК» (рис. 1).

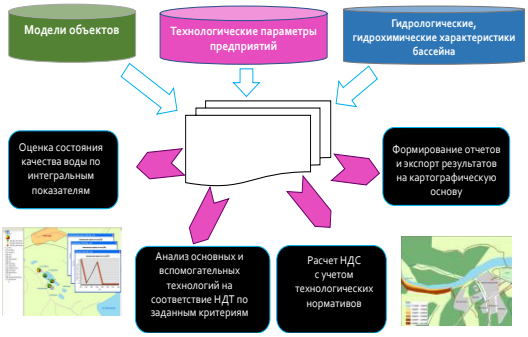


Рис. 1. Блок моделирования и экспорта результатов в ГИС-проект
Fig. 1. Block for modeling and exporting results to a GIS-project

Предложенная методика управления ТППК на основе геоинформационных технологий и функциональной модели нормирования допустимого воздействия производственных систем учитывает специфику всего комплекса их производственно-технологических характеристик. Для оценки состояния ТППК формируется ГИС-проект, позволяющий автоматизировать процессы сбора, обработки и представления данных с учетом других видов воздействий (рис. 2) [6].

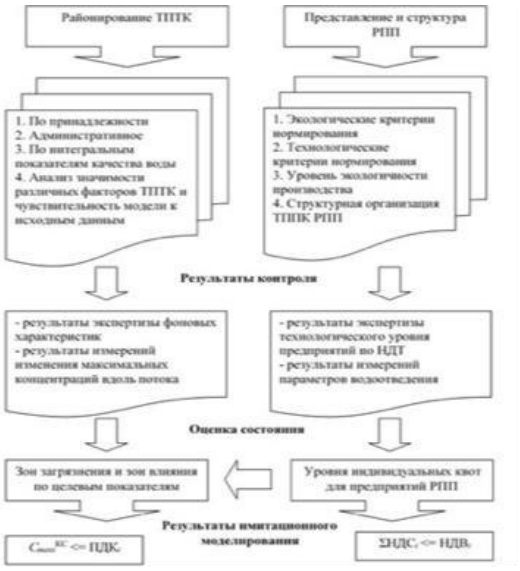


Рис. 2. ГИС-проект «Экологическое нормирование техногенной нагрузки производственных систем в ТППК»
Fig. 2. GIS-project «Environmental regulation of the technogenic load of production systems in the territorial natural-production complex»

В соответствии со структурой предложенного информационно-алгоритмического обеспечения в рамках разработки ГИС проекта создана модель водных объектов ТППК бассейна Финского залива и набор соответствующих геоинформационных карт (рис. 3–5).

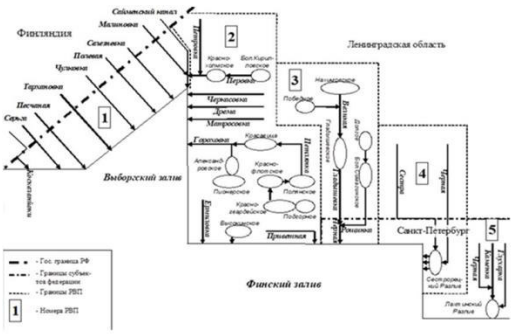


Рис. 3. Линейная схема ТППК бассейна Финского залива
Fig. 3. Linear scheme of the territorial natural-production complex of the gulf of Finland basin



Рис. 4. Геоинформационная карта ТППК бассейна Финского залива
Fig. 4. Geoinformation map of the territorial natural-production complex of the gulf of Finland basin

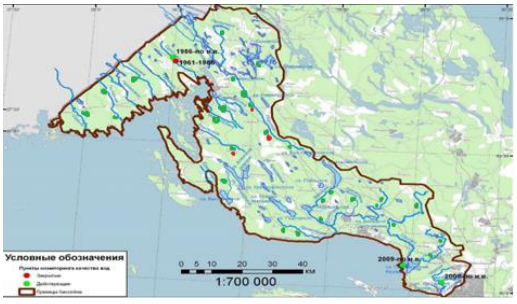


Рис. 5. Схема расположения точек контроля качества вод в бассейне Финского залива
Fig. 5. Scheme of location of water quality control points in the gulf of Finland basin

Заключение. Информационно-алгоритмическое обеспечение для формирования ГИС проектов по экологическому нормированию техногенной нагрузки предприятий ТППК бассейна Финского залива, позволило обосновать уменьшение массы загрязняющих веществ на 15–35% в зависимости от набора показателей и интегральной массы сброса сточных вод за счет учета специфики всего комплекса производственно-технологических характеристик и их взаимосвязи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.В.* Информационные измерительные системы. Комплексная оценка состояния объектов окружностей природной среды на основе ГИС-технологий // Вестник образования и развития науки российской академии естественных наук. 2001. № 5 (3). С. 230–240.

2. *Шишкин А.И., Антонов И.В., Епифанов А.В.* Геоинформационная моделирующая система нормирования допустимых сбросов для целлюлозно-бумажных комплексов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 1. С. 66–80.

3. *Дружинин Н.Н.*, *Шишкин А.И.* Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 329 с.

4. *Шишкин И.А., Шишкин А.И., Жильникова Н.А.* Современная концепция и методы нормирования техногенной нагрузки на водные объекты и предотвращения подтопления // Биосфера. 2018. Т. 10. № 2. С. 143–175.

5. *Потанин Г.Ю.*, *Кушнеров А.И., Шишкин А.И.* Схемотехническое моделирование для нормирования техногенной нагрузки на водные объекты // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник науч. трудов XI Междунар. конф. студентов и молодых ученых / под ред. Е.А. Вайтулевич; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2014. С. 665–667.

6. *Zhilnikova N.* Geoinformation modelling system of natural technical complexes for simulation modelling and optimization of load distribution // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 450. 2018. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/450/6/062010 (дата обращения: 01.07.2022).

MODELING OF REGULATION OF MAN-CAUSED LOAD FROM WATER USER ENTERPRISES IN TERRITORIAL NATURAL-PRODUCTION COMPLEXES

N.A. Zhilnikova, A.A. Baranova, V.O. Smirnova, I.A. Shishkin

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
RF, Saint-Petersburg, Bolshaya Morskaya St., 67

The structure of information-algorithmic support for environmental quality control and technogenic load regulation for water user enterprises is developed. A method for managing a territorial natural-production complex based on geoinformation technologies and a functional model for normalizing the permissible impact of production systems is proposed, which takes into account the specifics of the entire spectrum of their production and technological characteristics. Information and algorithmic support for the formation of GIS projects for the environmental regulation of the technogenic load of the territorial natural-production complex in the Gulf of Finland basin made it possible to substantiate a decrease in the mass of the pollutants from water user enterprises by 15-35%.

Keywords: natural-production complex, geoinformation systems, technogenic load, geoinformation modeling

REFERENCES

1. *Alekseyev V.V.* Informatsionnyye izmeritel′nyye sistemy. Kompleksnaya otsenka sostoyaniya ob″yektov okruzhnostey prirodnoy sredy na osnove GIS-tekhnologiy (Information measuring systems. Comprehensive assessment of the state of objects of circumferences of the natural environment based on GIS technologies). *Vestnik obrazovaniya i razvitiya nauki rossiyskoy akademii yestestvennykh nauk*, 2001, No. 5 (3), pp. 230–240.

2. *Shishkin A.I., Antonov I.V., and Yepifanov A.V.* Geoinformatsionnaya modeliruyushchaya sistema normirovaniya dopustimykh sbrosov dlya tsellyulozno-bumazhnykh kompleksov (Geoinformation modeling system for rationing permissible discharges for pulp and paper complexes). *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye*, 2011, No. 1, pp. 66–80.

3. *Druzhinin H.H. and Shishkin A.I.* Matematicheskoye modelirovaniye i prognozirovaniye zagryazneniya poverkhnostnykh vod sushi (Mathematical modeling and forecasting of land surface water pollution). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, 329 p.

4. *Shishkin I.A., Shishkin A.I., and Zhil'nikova N.A.* Sovremennaya kontseptsiya i metody normirovaniya tekhnogennoy nagruzki na vodnyye ob″yekty i predotvrashcheniya podtopleniya (The modern concept and methods of rationing the technogenic load on water bodies and preventing flooding). *Biosfera*, 2018, Vol. 10, No. 2, pp. 143–175.

5. *Potanin G.Yu., Kushnerov A.I., and Shishkin A.I.* Skhemotekhnicheskoye modelirovaniye dlya normirovaniya tekhnogennoy nagruzki na vodnyye ob″yekty (Circuit modeling for regulation of technogenic load on water bodies), Perspektivy razvitiya fundamental′nykh nauk, XI Mezhdunarodnoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh (Prospects for the development of fundamental sciences, XI International conference of students and young scientists), Tomsk, 22-25 April 2014, Tomsk: National research Tomsk polytechnic university, 2014, pp. 665–667.

6. *Zhilnikova N.* Geoinformation modelling system of natural technical complexes for simulation modelling and optimization of load distribution, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 450, 2018, available at: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/450/6/062010 (July 01, 2022).

УДК 004.56 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-84-96

КОЛЛАБОРАЦИОННЫЕ СТРАТЕГИИ ОБНАРУЖЕНИЯ УЯЗВИМОСТЕЙ ИНТЕРФЕЙСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ПТС ПРИ ТЕХНОЛОГИЯХ 5G

А.В. Скатков, А.А. Брюховецкий

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: a.alexir@mail.ru

Рассматривается стратегия обнаружения уязвимостей интерфейсов информационно-измерительных сетей, базирующаяся на децентрализованных дисциплинах обслуживания тестированием состояний природно-технических объектов (ПТО) и систем (ПТС). Развиваются методы динамического обнаружения аномалий в информационных потоках данных в интеллектуальных сетях с учетом особенностей технологий 5G. Повышается достоверность принимаемых решений в условиях стохастической высокодинамичной среды, характеризующейся быстро изменяющейся топологией сети, ее мобильностью, пространственной плотностью, локализацией узлов. Разработана модель, формирующая виртуальные коллаборации узлов сети и позволяющая перейти от обработки переменной структуры топологии сети к квазипостоянной.
Ключевые слова: децентрализованная обработка, коллаборации узлов, графовая модель, покрытие множеств, принятие решений, обнаружение уязвимостей

Поступила в редакцию: 08.08.2022. После доработки: 29.08.2022.

Введение. Технология 5G становится перспективной в мобильных сетях беспроводной связи. Концепция 5G включает [1, 2]:

- eMBB (расширенная мобильная широкополосная связь);
- uRLLC (сверхнадежная связь с малой задержкой);
- mMTC (массовая связь машинного типа).

Важный принцип беспроводной сети связи заключается в использовании диапазона высоких частот mmwave до 300 ГГц и плотности подключения устройств, превышающей 10^6/км^2. Поэтому, принимая во внимание гетерогенный характер технологий, необходимы передовые исследования в отношении различных особенностей связи. Мобильные граничные вычисления рассматриваются как одна из современных парадигм, позволяющих решить проблему вычислений высокой сложности и значительно снизить задержку передаваемых сигналов.

Для выполнения мер безопасности требуются передовые решения, обеспечивающие конфиденциальность, аутентификацию, целостность и доступность [3]. Поэтому точность этих параметров должна быть соблюдена. При этом время, затрачиваемое на обнаружение неправильного состояния устройства в сети, должно быть меньше времени передачи данных [4].

Одной из ключевых задач остается обеспечение безопасности интерфейсов при взаимодействии устройств, подключенных по гетерогенным технологиям к интеллектуальным мобильным сетям (рис. 1) [5].

Транспортные одноранговые сети представляют собой особые типы сетей с высокой степенью мобильности узлов. Эти сети поддерживают различные сервисы, такие как доступ к интернету, интеллектуальные мобильные системы, приложения для потокового онлайн-видео.

Согласно требованиям стандартов 3GPP, все решения для обеспечения безопасности, связанные с V2I и V2V, должны быть сосредоточены на трех основных элементах: конфиденциальности, целостности и доступности. В табл. 1 приводятся основные типы атак на инфраструктуру с указанием скомпрометированного элемента безопасности и эффекта от воздействия атак [6, 7].

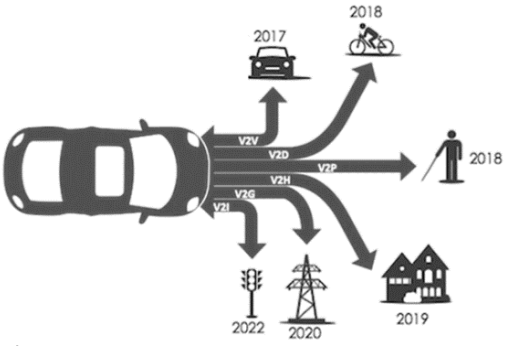


Рис. 1. Взаимодействие устройств в сетях 5G: устройство-устройство, устройство – инфраструктура, устройство – пешеход, устройство – электросеть, устройство – устройство
Fig. 1. Interaction of devices in 5G networks: vehicle-to-vehicle, (V2V), vehicle-to-infrastructure (V2I), vehicle-to-pedestrian (V2P), vehicle-to-grid (V2G), vehicle-to-device (V2D)

Таблица 1. Анализ основных типов атак на инфраструктуру V2I

Тип атаки	Скомпрометированный элемент безопасности			Эффект от атаки
	Доступность	Целостность	Конфиденциальность	
DDoS	Высокая	Умеренная	Низкая	Недоступность сервиса, крах сети, нарушение целостности сервиса
Атака с подменой	Низкая	Умеренная	Высокая	Нарушение работы сети, сокрытие личных данных и получение привилегий являются основными мотивами злоумышленника
Дублирование блоков сообщений	Умеренная	Высокая	Умеренная	Влияет на целостность и конфденциальность среды V2I, тем самым влияя на службу безопасности, предоставляемую RSU
Вредоносные программы и спам	Умеренная	Низкая	Высокая	Вредоносное ПО может привести к потенциальным серьезным сбоям в обслуживании RSU. Воздействие считается высоким из-за его длительных отключений. Вредоносное ПО может быть внедрено в систему во время обновления программного обеспечения RSU
Подслушивание	Низкая	Низкая	Высокая	Целью подслушивания является кража конфиденциальной и личной информацию, которая хранится в браузере

Сети транспортных средств очень динамичны и не имеют централизованного управления. Как следствие, обмен информацией между средствами не всегда надежен, учитывая гетерогенный характер технологий применяемых в сетях 5G. В настоящее время работы для обеспечения безопасности развиваются по следующим основным направлениям: реальные исследования на действующей инфраструктуре, аналитическое и имитационное моделирование [8, 9]. Как правило, на практике в подавляющем большинстве случаев используются имитационные модели, применение которых позволяет исследовать механизмы осуществления атак в различных сцена-

риях с применением гибких методов структурно-параметрической настройки.

В работах [10, 11] приводятся характеристики потоков связи мобильных средств. В табл. 2 представлены некоторые основные характеристики средств, которые доступны в интеллектуальных мобильных сетях 5G.

Таблица 2. Доступные характеристики мобильных средств

Обозначение	Описание
ID_v	Идентификатор средства
$Li(x,y)$	Местоположение -го средства с долготой x и широтой y
$Lrsu(x,y)$	Местоположение RSU с долготой x и широтой y
Si	Результирующая скорость -го средства
Ri	Дальность связи -го средства
$Rrsu$	Дальность связи RSU
$Ti,start$	Время, когда -е средство попадает в зону действия RSU
Ti,end	Время, когда -е средство покидает зону действия RSU
ei,j	Соседние отношения между -ым и j-ым средством
$Nrsu$	Количество средств в пределах диапазона связи RSU
$DRRi$	Скорость приема данных i-ым средством
PDR	Коэффициент отбрасывания пакетов
PSR	Коэффициент отправки пакетов
MDR	Коэффициент дублирования сообщений
$RSRP$	Мощность принятого сигнала
$RSRQ$	Качество принятого сигнала
$RSINR$	Отношение сигнал/шум
$THPut$	Пропускная способность
RSU_id	Указывает (анонимизированный) идентификатор RSU

Как показывают результаты исследований по обеспечению безопасности узлов в мобильных сетях 5G, создание универсальной модели обнаружения уязвимостей интерфейсов транспортных средств сопряжено с неразрешимыми проблемами.

Разработка универсальных подходов повышения достоверности о поведении мобильных средств должна быть направлена на снижение неопределенности внешней среды, учитывая:

- противоречивую функциональность устройств в условиях постоянно меняющейся топологии сети,
- распределенный характер транспортных средств,
- постоянное взаимодействие устройств друг с другом и другое.

В связи с этим разработка моделей на основе технологий 5G, обеспечивающих надежность и быстродействие механизма совместной работы устройств в условиях стохастической внешней среды, в значительной мере определяют достоверность оценок и эффективность принятия решений при обнаружении уязвимостей интерфейсов устройств в интеллектуальных мобильных сетях.

Описание структурно-функциональных элементов и их информационного взаимодействия в сети. Считается, что техническое средство (ТС) в предлагаемой модели является интеллектуальным устройством. Предполагается, что каждое средство имеет:

- уникальный зарегистрированный идентификатор (например, электронный номерной знак или электронный номер шасси, выданный производителем ТС),
- навигационную систему на основе глобальной системы позиционирования (GPS/ГЛОНАСС), чтобы знать информацию о его мобильности и географическом местоположении,
- локальные часы, которые синхронизированы с GPS.

На рис. 2 показана архитектура сети, состоящая из трех основных уровней: уровня датчиков, уровня базовых станций и облака. Подключенные средства могут взаимодействовать с внутренней (т.е. V2S (vehicle-to-sensor)) и внешней средами, такими как V2V и V2I, включая придорожные устройства – базовые станции (RSU), которые используют выделенную связь ближнего действия (DSRC).

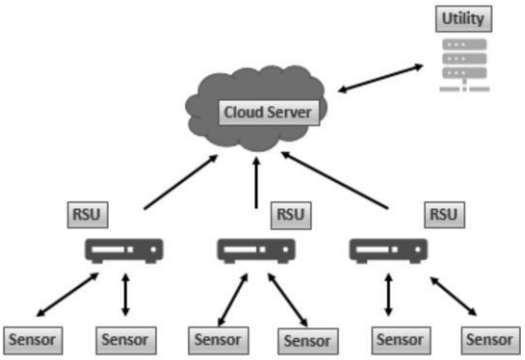


Рис. 2. Информационное взаимодействие структурно-функциональных элементов в сети
Fig. 2. Information interaction of structural and functional elements in the network

Бортовой блок, размещенный внутри транспортного средства, передает информацию в окружающую среду. RSU собирают данные с транспортных средств, а приложения, установленные в RSU, предоставляют запрошенную услугу. Вместе сеть датчиков обеспечивает мониторинг сети в режиме реального времени.

RSU – это устройства размещенные на границе сети по всей магистрали, которые способны собирать и передавать данные с множества датчиков к централизованно расположенной облачной системе маршрутизации.

Централизованное облако – доступная облачная сеть, обеспечивающая дополнительные возможности обработки при обнаружении уязвимостей на уровне датчиков. Определение уровня зоны выполняется на уровне RSU, в то время как более дорогостоящее с точки зрения вычислений уровня датчиков выполняется в облаке.

Предлагаемая модель включает в себя следующие основные компоненты:

- Обычный узел (TCn): узлы, которые взаимодействуют с другими узлами для обмена информацией в пределах диапазона связи друг с другом. Эти узлы образуют виртуальные группы. Каждый узел содержит идентификатор узла координатора, которому пересылается информация о текущем состоянии узла за период времени Δt. Транспортные средства-участники TCn, которые взаимодействуют друг с другом, отвечают за вычисление прямых значений приоритетов других участников.
- Узел координатор (KCh): узел с высоким приоритетом назначается в качестве узла координатора виртуальной группы в пределах диапазона связи с каждым TCn. Он отслеживает деятельность TCn и пересылает измеренные значения свойств TCn базовой станции (RSU). Кроме того, KCh отвечает за вычисление агрегированных значений приоритета и пересылку информации о потоке трафика достижимых узлов TCn в RSU.
- Базовая станция (RSU): принимает данные от координаторов, выполняет их обработку: формирует матрицу смежности, строит безызбыточные покрытия, формирует минимальные покрытия на основе количественной оценки (число связей), формирует коллаборации узлов с учетом веса каждого свойства узла – репутация узла, которая оценивается качественными значениями характеристик узлов, вычисляет оценки свойств с целью выявления случаев аномального поведения отдельных узлов и принятия обоснованного решения. В случае большой загрузки RSU передают данные с множества датчиков к централизованно расположенной облачной системе. Чтобы свести к минимуму задержки в сети, RSU располагают как можно ближе к датчикам устройств, и поскольку RSU являются маломощными устройствами, ограничивается максимальное количество датчиков, подключенных к одному RSU.

Положение и характеристики транспортного средства *TCi* фиксируются в каждый квант времени Δt. В предлагаемой модели средства *TCi* и *TCj* взаимодействует между собой и соседними RSU тогда и только тогда, когда они находятся в диапазонах связи друг с другом, т.е. RSU отвечает за прием сообщений маяка от соседних транспортных средств и делится этими сообщениями с соседними RSU. Формат сообщения маяка включает в себя идентификатор средства и содержит важные для контроля значения состояний некоторых характеристик узлов, перечисленных в табл. 2.

Кроме того, в каждый квант времени Δt базовая станция назначает приоритет *R* узлам, оценка которых определяется репутацией средства. Приоритет может назначаться в зависимости от числа и надежности связей, установленных в данный момент времени каждым *TC*. Поэтому в общем случае в зависимости от ситуации на дороге будет назначено множество узлов координаторов *KCi*, обладающих высоким приоритетом. Каждый такой узел *KCi* будет взаимодействовать с роем узлов *TCj*, с которыми установлена надежная связь и которые будут пересылать собранные данные узлу *KCi*. Именно узлы координаторы *KCi* вычисляют агрегированные значения приоритетов и передают полученную информацию со «своих» узлов *TCj* базовой станции.

Затем *RSU* обрабатывает информацию поступившую от транспортных средств в течение выделенного кванта времени Δt. *RSU* формирует выборки значений характеристик *TCj*, строит минимальные покрытия *C* и находит множества коллабораций C^K, обеспечивающих высокую достоверность оценок контролируемых характеристик. Далее вычисляются оценки достоверности поведения узлов в сети. Вычисленные оценки на временном интервале Δt сравниваются с оценками на интервале $\Delta(t\text{-}1)$. При обнаружении расхождений фиксируется уровень достоверности аномального поведения узлов. Базовая станция, в случае критической оценки узлов, принимает решение по ограничению их функционирования. В результате к следующему кванту времени $\Delta(t+1)$ формируются новые виртуальные группы, обновляется информация о приоритетах узлов, назначаются узлы *KC* с высоким приоритетом.

Постановка задачи формирования коллабораций. Цель – разработка модели кластерной виртуальной архитектуры топологии сети, ориентированной на децентрализованную обработку характеристик датчиков устройств в режиме реального времени и обеспечивающей достоверность принятия решений по обнаружению уязвимостей интерфейсов *TC*. Предлагаемая модель учитывает высокую мобильность узлов и изменения топологии сети. Модель разрабатывается на основе понятия коллаборации – совместного взаимодействия множества узлов, обеспечивающих достоверность оценок о их состояниях. Формирование коллаборации C^K и выбор координатора коллаборации *KC* основаны на уровне доверия транспортного средства, дальности передачи пакетов, низкой задержки и других. При формировании кластеров каждое средство отслеживает своих соседей в диапазонах связей и присваивает ему уровень доверия, которые агрегируются узлом координатором *KC*. При обнаружении подозрительного узла средство мониторинга *TC* пересылает идентификатор этого узла координатору *KC* для принятия решения – является ли этот подозреваемый узел вредоносным или нет. В коллаборации включаются узлы, которые имеют апробированные маршруты, устойчивую надежную связь с пунктом диспетчеризации, избыточные вычислительные ресурсы и др.

Для обеспечения качества функционирования системы обнаружения уязвимостей (СОУ) необходимо решить оптимизационную задачу максимизации значения выражения (1) при выборе коллаборационной стратегии обнаружения уязвимостей интерфейсов ПТС, направленной на формирование квазипостоянной топологии сети

$$Q(t_k,\ st_k,\ ks_k(kk_k,\ dk_k,\ dd_k,\ e_k), f_k,\ v_k,\ r_k,\ w_k,\ I_k,\ \xi\ ) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где Q – показатель качества функционирования СОУ, который определяется структурными решениями st_k и рядом следующих параметров:
t_k – терминальное операционное время,
ks_k (kk_k ,dk_k, dd_k, e_k) – коллаборационная стратегия обнаружения уязвимостей,
kk_k – характеристическое отношение,
dk_k – правила формирования коллабораций,
dd_k – агрегированные правила оценки достоверности по обнаружению уязвимостей,
e_k – тип тестирования,
f_k – частота тестирования,
v_k – полнота тестирования,
r_k – коэффициент относительности используемого процессорного времени,
w_k – объем резервного ресурса,
I_k – апостериорная информация, поступающая от СОУ,
ξ – помехи, неконтролируемые воздействия и т.п.

Решение задачи необходимо найти в области ее допустимых решений:

$$kk_k \in KK,\ dk_k \in DK,\ dd_k \in DD,\ e_k \in E,$$
$$st_k \in ST,\ f_k \in F,\ v_k \in V,\ r_k \in R,\ w_k \in W.$$

Сеть мобильных средств представляется в виде ориентированного двудольного графа $G = (TC,E,R,W,T)$, с единичной длиной пути достижимости (рис. 3), где $TC(t)$ – множество вершин – мобильных средств в сети в момент времени t.
$E(t) = \{e(i,j)\}$ множество дуг – связей между вершинами,
$R(t)$ – ранг вершины (число связей),
$W(t)$ – множество весов, приписанных дугам графа, $w(i,j)$ – вес дуги $e(i,j)$ обозначает взвешенный приоритет связи, которая обеспечивает достоверность характеристик узлов.
$TC=\{X,Y\}$, X – множество узлов координаторов, Y – множество обычных узлов (рис. 3).
$M(X,Y,R)$ – матрица смежности,
где X – множество строк, i=1,m;
Y – множество столбцов, j=1,n;

Элемент матрицы (i, j) ϵ {0;1}, «1» – означает, что узел Xi находится в диапазоне связи с узлом Yj.

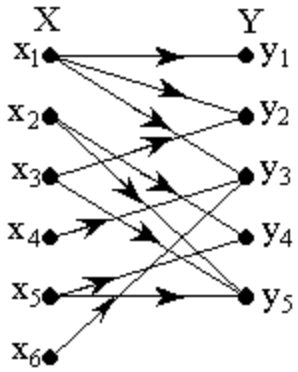


Рис. 3. Связи узлов КС с ТС
Fig. 3. Connections of CS nodes with TS

Ri – ранг вершины Xi – число связей с Yj, $Ri = |e(i,j)|$,
R^w_i – взвешенный ранг вершины Xi , $R^w_i = \sum_{j=1}^{n} w(i,j)$,
C – множество минимальных покрытий $C = \{C_1, C_2, \ldots C_r\}$,
C^K – множества коллабораций $\{C^K_1$, $C^K_2 \ldots C^K_r\}$,
V_{jl} – расчетная статистика (множество l-типов выборок контролируемых характеристик $\{V_1, V_2, \ldots V_l\}$ TCj, $V_{jl}=\{v_{jl1}, v_{jl2} \ldots v_{jlk}\}$ – элементы j-го узла l-го типа выборки),
KR_{lt} – критическое значение для l-ой статистики, принятые в момент времени t,
COMP (V_{jl}, KR_{lt}) => σ_{lt} – бинарный сигнал (булевский) на выходе модуля сравнения, реализующего оператор управления для l-го критерия непараметрической статистики,
D_{Ci} – уровень доверия к множеству $C^K i$.

Алгоритмы формирования коллабораций узлов. Задача покрытия относится к классу оптимизационных комбинаторных задач. Она сводится к задаче поиска в некотором конечном множестве определённых подмножеств с заданными свойствами. В контексте разработки предлагаемой модели речь идет о фор-

мировании множества узлов координаторов, каждый из которых имеет надежную связь с другими узлами сети и обеспечивает достоверность оценок заданных характеристик узлов. Требуется построить множество покрытий *C* минимальной мощности, обеспечивающие качественные оценки характеристик ТС в пределах устойчивого диапазона связи.

Задача о покрытии относится к классу NP-сложных [10]. Ее решение в реальном времени, требующее полного перебора, для большинства практических задач неприемлемо из-за большой размерности решаемой задачи (2^m), ограниченного времени и недостаточности ресурсов. Поэтому предлагается снижать вычислительную сложность решения задачи за счет перераспределения процессов обработки данных.

Алгоритм содержит следующую последовательность действий:

1. Этап 1. Построение минимальных (по числу элементов множеств) покрытий *C* графа (невзвешенный случай – без учета весов дуг, учитываются только ранги Ri – число связей $|e(i,j)|$ между узлом *Xi* с узлами *Yj*).

1.1 Генерация графа $G(TC, E, R,W)$ на основе заданного множества вершин TC, $R \in [1;|e|]$,

1.1.1 Генерация для каждой TCi значения *Ri*,

1.1.2 Генерация связей $e(i, j)$.

1.2 Формирование матрицы смежности $M(X,Y,R)$.

1.3 Построение множества безызбыточных покрытий *C*.

1.4 Построение множества минимальных (по числу элементов подмножеств) покрытий *Ci* графа.

2. Этап 2. Формирование коллабораций C^K (взвешенный случай). Среди минимальных подмножеств выбирается подмножество с учетом оценок весов $w(i,j)$, полученных по заданным свойствам *TC*.

2.1 Агрегирование значений обработки характеристик *TCj* на уровне узлов.

2.1.1 Формирование *l*-ой расчетной статистики характеристик V_{jl} для каждого *TCj*.

2.1.2 Сравнение с критическими значениями $\mathrm{COMP}(KR_{lt}, V_{jl})$.

2.1.3 Оценка рангов $R^w_{Ci,v}$ элементов множеств *Ci*.

2.2 Формирование структуры для оценки уровня доверия D_{Ci}.

2.3 Выбор коллабораций $C^K i$ для которых $D_{Ci} = \max$.

2.4 Назначение узлов координаторов *KC*.

3. Этап 3. Интеграция оценок на уровне RSU для окончательного принятия решения о подозрительном поведении узлов.

Задача о покрытии формулируется как описано ниже [12]. Экземпляр (X,F) задачи о покрытии множества состоит из конечного множества *X* и такого семейства *F* подмножеств множества *X*, что каждый элемент множества *X* принадлежит хотя бы одному подмножеству из семейства *F*:

$$X = \mathrm{U}_{S \in F} S.$$

Подмножество $S \in F$ покрывает содержащиеся в нем элементы. Задача состоит в том, чтобы найти подмножество $C \subseteq F$ минимального размера, члены которого покрывают все множество *X*:

$$X = \mathrm{U}_{S \in C} S. \qquad (2)$$

Считается, что любое семейство *C*, удовлетворяющее уравнению (2), покрывает множество *X*. Размер семейства *C* определяется как количество содержащихся в нем подмножеств.

Алгоритм покрытия (X, F)

1 $U \leftarrow X$

2 $C \leftarrow \emptyset$

3 while U _= ∅

4 do выбирается подмножество $S \in F$, максимизирующее величину $|S \cap U|$

5 $U \leftarrow U - S$

6 $C \leftarrow C \cup \{S\}$

7 return *C*

Опишем принцип действия алгоритма. На каждом этапе его работы множество *U* содержит оставшиеся непокрытыми элементы. Множество *C* содержит покрытие, которое конструируется.

Строка 4 – это этап принятия решения в жадном методе.

Выбирается подмножество *S*, покрывающее максимально возможное количество еще непокрытых элементов. После выбора подмножества *S* его элементы удаляются из множества *U*, а подмножество *S* помещается в семейство *C*. Когда алгоритм завершает свою работу, множество *C* будет содержать подсемейство семейства *F*, покрывающее множество *X*.

Припишем строкам безызбыточной матрицы булевы переменные $s_1,\ldots,s_m$. Обозначим через *S* произвольное подмножество строк и положим $s_i = 1$, если и только если *i*-я строка принадлежит множеству *S*, то есть будем задавать подмножество *S* строк матрицы набором σ значений переменных $s_1,\ldots, s_m$ [12].

В соответствии с определением булевой функции $p(s_1,\ldots, s_m)$, принимающей значение единицы на тех и только тех наборах σ, которые задают покрытия матрицы, назовем функцией покрытия матрицы.

Тогда функция покрытия матрицы с *k* столбцами задается конъюнкцией вида

$D_1 \ldots D_k$, где D_j – дизъюнкция всех переменных, приписанных строкам с единицей в *j*-м столбце. Будем называть полученную формулу *конъюнктивной нормальной формой* (*КНФ*) функции покрытия:

$$КНФ_p = p(s_1, \ldots, s_m) = D_1 \wedge D_2 \ldots \wedge D_k. \quad (3)$$

Так как каждый элемент дизъюнкции D_j задает безызбыточное покрытие *j*-го столбца, то, перемножив дизъюнкции D_i и D_j, мы получим все безызбыточные покрытия столбцов *i* и *j* (но не только безызбыточные).

Обобщая приведенные рассуждения на все столбцы булевой матрицы, приходим к выводу, что для построения всех безызбыточных покрытий матрицы надо перемножать все дизъюнкции *КНФ* функции покрытия, выполняя при этом все возможные поглощения. В результате будет получена *ДНФ*, конъюнкции которой зададут все безызбыточные покрытия

$$ДНФ = C_1 \vee C_2 \ldots C_u. \quad (4)$$

Из полученного множества покрытий выбираются покрытия минимальной длины:

$$C = \{C_1, C_2, \ldots C_r\}.$$

На втором этапе алгоритма на основе вычисленных значений характеристик *Vj* каждому ребру графа приписываются оценки R^w по каждому контролируемому свойству, например: скорость приема данных, коэффициент отбрасывания пакетов, мощность принятого сигнала, качество принятого сигнала, пропускная способность и другие. В результате формируется структура матрицы (табл. 3) для оценки и выбора множества *Ci* с максимальным значением уровнем доверия $D_{Ci} = \max$.

Таблица 3. Структура минимальных множеств и контролируемых свойств узлов сети

	C_1	C_2		C_r
V_1	R^w_{11}	R^w_{12}	…..	R^w_{1r}
V_2	R^w_{21}	R^w_{22}	…..	R^w_{2r}
….	…..	…..	…..	…..
….	…..	…..	…..	…..
V_1	R^w_{1l}	R^w_{2l}	…..	R^w_{lr}
D_{Ci}	D_{C1}	D_{C2}		D_{Cr}

Предлагается использовать трехзонную систему распознавания ситуаций и принятия решений. Будем полагать, что значение уровня доверия D_{Ci} каждого подмножества $C^K i$ оценивается интегрально по заданным свойствам *Vj* с использованием шкалы, содержащей три интервала [0; *Z*1; *Z*2; 1]:

$0 \le D_{Ci} < Z1$ – низкий,
$Z1 \le D_{Ci} < Z2$ – средний,
$Z2 \le D_{Ci} < 1$ – высокий.

Тогда интегральная оценка уровня доверия D_{Ci} будет вычислена как:

$$D_{Ci} = R^{w}_{ij} / \sum_{j=1}^{l} R^{w} ij \ . \qquad (5)$$

Узлы множества Ci, для которых D_{Ci} = max , будут включены в коллаборацию $C^{K}i$ и $Xi \in C^{K}i$ будут назначены в качестве координаторов KC в следующем временном такте обработки.

Рассмотрим преимущество использования подхода на основе коллаборации узлов, которые осуществляют взаимное тестирование характеристик в виртуальной группе. Введем обозначения событий в сети: A – атака/уязвимость, R – атака/уязвимость обнаружена.

Тогда вероятности появления событий при тестировании обозначим так:

$P(A,R)$ – атака есть и она обнаружена,

$Q(A,\bar{R})$ – атака есть, но она не обнаружена,

$S(\bar{A},R)$ – атаки нет, но она обнаружена,

$T(\bar{A},\bar{R})$ – атаки нет и она не обнаружена

1) Рассмотрим появление события $P(A,R)$. Пусть p – вероятность обнаружить атаку за одно тестирование одним устройством. Проведем k тестов. Тогда вероятность обнаружить атаку на k-ом тестировании:

$$P(p,k) = p\,(1\text{-}p)^{k-1}. \qquad (6)$$

2) Случай взаимного тестирования устройств. Будем считать вероятность обнаружения каждым устройством – p. Пусть в группе из n устройств взаимное тестирование выполняют k устройств, $1 \le k \le n$. Тогда вероятность обнаружить атаку за k тестов при биномиальном распределении будет:

$$P(p,k,n) = C^{k}_{n} p^{k} (1\text{-}p)^{n-k}. \qquad (7)$$

При больших n биномиальное распределение стремится к пуассоновскому.

Сравним вероятности одиночного $P(p,k)$ и совместного $P(p,k,n)$ тестирования. На рис. 4–7 показаны зависимости изменения вероятностей обнаружения уязвимостей при различных значениях p, k, n.

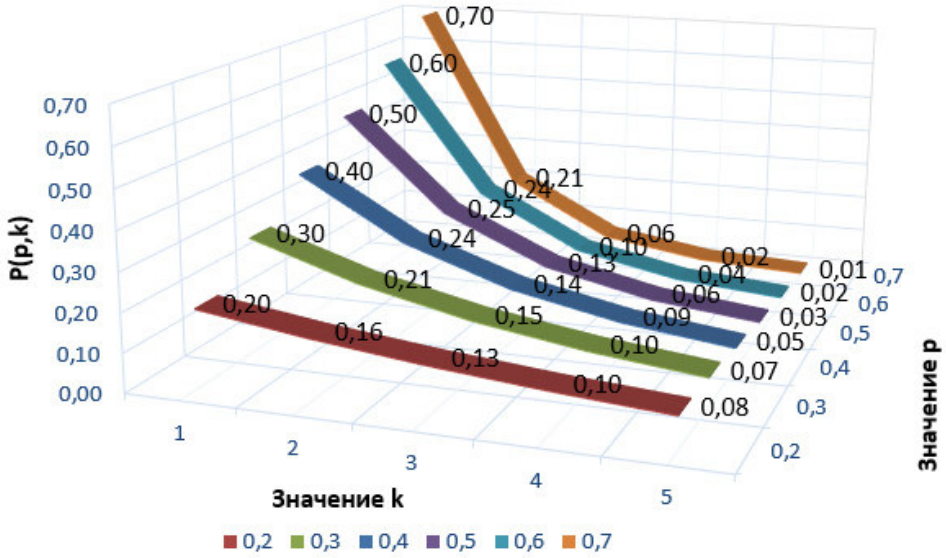


Рис. 4. Вероятность $P(p,k)$ одиночного обнаружения уязвимости на k-ом тесте
Fig. 4. Probability $P(p,k)$ of a single discovery of a vulnerability on the k-th test

При одиночном тестировании максимальная вероятность при заданном p достигается при $k = 1$. При увеличении p вероятность уменьшается. Кроме первого значения вероятности $P(p, k)$ не высокие и последующее тестирование избыточно.

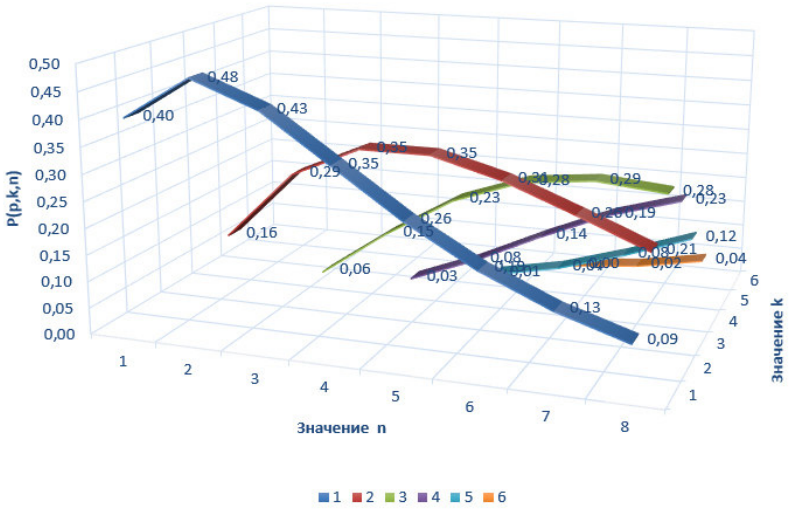


Рис. 5. Вероятность $P(p,k,n)$ совместного обнаружения уязвимости на k-ом тесте при малых значениях p (p = 0,4)
Fig. 5. Probability $P(p,k,n)$ of joint detection of a vulnerability on the k-th test for small values of p (p = 0,4)

При совместном тестировании при малых значениях p<= 0,4 наблюдается увеличение значения $P(p,k,n)$ при возрастании n и/или k. Однако затем оно снижается. Имеется экстремум, который дает максимальное значение вероятности $P_{max}(p,k,n)$.

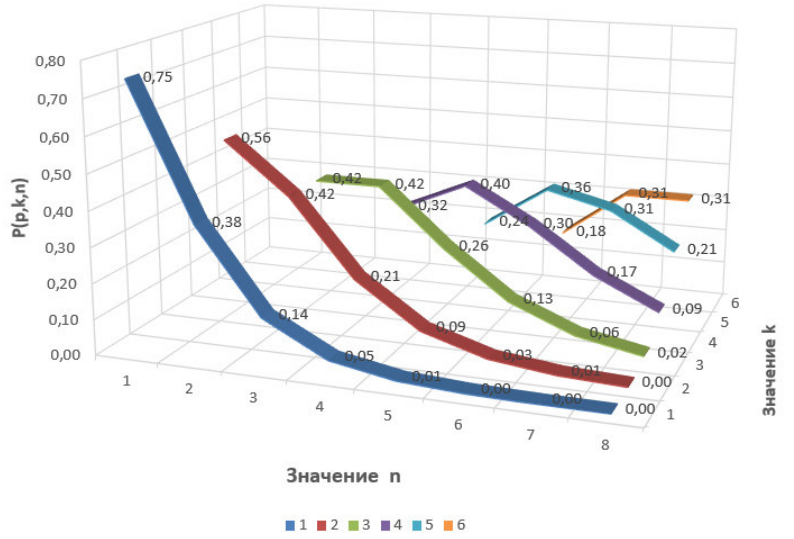


Рис. 6. Вероятность $P(p,k,n)$ совместного обнаружения уязвимости на k-ом тесте при больших значениях p (p = 0,75)
Fig. 6. Probability $P(p,k,n)$ of joint detection of a vulnerability on the k-th test for large values of p (p = 0,75)

Первичное тестирование при k=1 высокоэффективно при большом значении p=>0,75, т.к. имеем большое значение $P(p,k,n)$. При совместном тестировании при больших n обнаружение низкое и при малых и больших значениях k, т.к. обнаружение уязвимости происходит раньше.

Насколько необходимо повторное тестирование, если произошло обнару-

жение первый раз на шаге k=1, чтобы быть уверенным в достоверности оценки $P(p,k,n)$ обнаружения уязвимости? Может быть предложено следующее правило:

- Если p<= 0,4 , то повторное тестирование может быть оправдано, т.к. при увеличении n и/или k будет увеличиваться вероятность $P(p,k,n)$ до определенного значения P_{max} (p,k,n) при заданных p,k,n.
- Если p => 0,7 , то повторное тестирование нецелесообразно, т.к. значение $P(p,k,n)$ с увеличением n уменьшается.

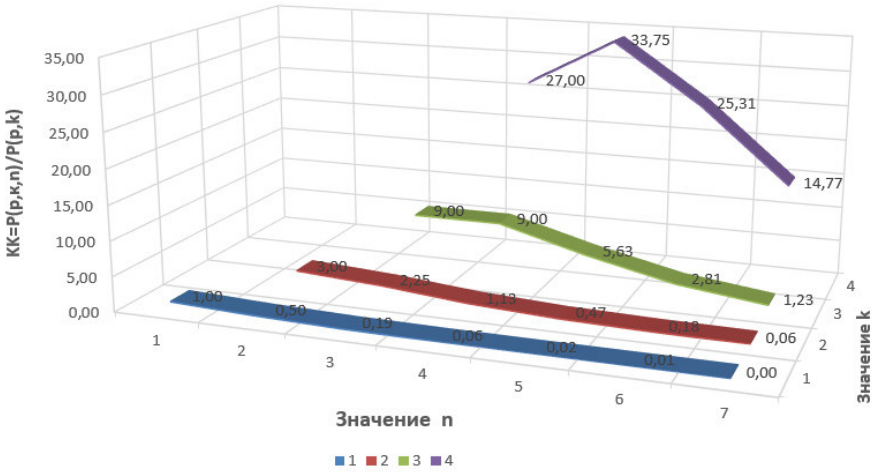


Рис. 7. Изменение величины характеристического отношения $KK=P(p,k,n)/P(p,k)$, p=0,75 в зависимости от мощности коллаборации

Fig. 7. Change in the value of the characteristic ratio $KK=P(p,k,n)/P(p,k)$, p=0,75 depending on the power of the collaboration

Исследование величины характеристического отношения $KK=P(p,k,n)/P(p,k)$ подтверждает следующее: чем больше KK, тем более оправдано использовать коллаборацию при заданных p,k,n, в случаях, когда при увеличении k и/или n KK продолжает возрастать, а значит применение подхода на основе коллабораций повышает достоверность по сравнению с одиночным тестированием. Построенный график $P(p,k,n)/P(p,k)$ позволяет определить зоны обнаружения уязвимостей для двух стратегий:

- менее эффективной, но более быстродействующей и менее затратной, когда с высокой вероятностью происходит обнаружение уязвимости на первом шаге, а на последующих шагах вероятность снижается,
- высокоэффективной, когда при последующем тестировании значение $P(p,k,n)$ увеличивается с возрастанием n и/или k – эффект коллаборации.

Таким образом, при совместном тестировании имеется возможность сформировать коллаборационную стратегию контроля, когда для заданной вероятности обнаружения задаются области необходимых значений параметров n и k, обеспечивающих высокое $P(p,k,n)$ по сравнению с $P(p,k)$.

Схема принятия решений предполагает для заданных событий P,Q,S,T определение мощности коллабораций, для которых оправдано их применение с точки зрения вероятностей обнаружения уязвимостей.

Заключение. Предложен подход, базирующийся на децентрализованной обработке при тестировании состояний природно-технических объектов интеллектуальной информационно-измерительной сети в условиях 5G. Первичные датчики измерений параметров окружающей среды в процессе эксплуатации выходят из строя из-за воздействия агрессивной среды и преднамеренных

действий. В результате встречаются систематические ошибки измерений контролируемых величин вследствии появления уязвимостей. Представленный подход в отличие от известных позволяет обнаруживать уязвимости интерфейсов устройств при совместном тестировании их свойств. Подход развивает методы динамического обнаружения аномалий в информационных потоках данных в интеллектуальных информационно-измерительных сетях. Применение предлагаемого подхода направлено на повышение достоверности принимаемых решений в условиях стохастической высокодинамичной среды, характеризующейся быстро изменяющейся топологией сети, мобильностью и плотностью узлов. Для этой цели формализована задача поиска оптимальной стратегии обнаружения уязвимостей, предложена графовая модель формирования виртуальных коллабораций узлов сети, которая позволяет перейти от обработки переменной структуры топологии сети к квазипостоянной. Приведен алгоритм формирования минимальных покрытий, проанализировано характеристическое отношение, величина которого подтверждает эффективность применения разработанного подхода на основе коллабораций по сравнению с традиционным одиночным тестированием.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-29-06015/20, № 19-29-06023/20.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jie Ji.* Service Security Issues in the 5G Core Network and How to Detect Them. https://nsfocusglobal.com/new-architecture-new-challenges-service-security-issues-in-the-5g-core-network-and-how-to-detect-them/ (дата обращения: 06.07.2022).

2. *Shafi M.* 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice // IEEE Journal on selected areas in communications. 2017. Vol. 35(6). P. 1201–1221.

3. *Rupprecht D., Dabrowski A., Holz T., Weippl E., Pöpper C.* On security research towards future mobile network generations // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20(3). P. 2518–2542.

4. *Chopra G., Jain S., Jha R.K.* Possible security attack modeling in ultradense networks using high-speed handover management // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 67(3). P. 2178–2192.

5. *Engoulou R.G., Bellaïche M., Pierre S., Quintero A.* VANET security surveys // Computer Communications. 2014. Vol. 44. P. 1–13.

6. *Chen J.* Service-oriented dynamic connection management for software-defined internet of vehicles // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2017. Vol. 18(10). P. 2826–2837.

7. *Fatih S., Sevil S.* A Survey of Attacks and Detection Mechanisms on Intelligent Transportation Systems:VANETs and IoV // Ad Hoc Networks. 2017. № 61. P. 1570–8705.

8. *Скатков А.В.* Адаптивное обнаружение уязвимостей интерфейсов беспилотных транспортных средств / А.В. Скатков, А.А. Брюховецкий, Ю.В. Доронина и др. Симферополь: Изд-во «Ариал», 2020. 352 с.

9. *Скатков А.В., Моисеев Д.В., Брюховецкий А.А.* Структурный синтез каналов информационных обменов для беспилотных транспортных средств. Симферополь: Изд-во «Ариал», 2020. 320 с.

10. *Skanda V.* Cyberphysical risks of hacked internet-connected vehicles // Physical reviewe. July 2019. Vol. 100(1). P. 1–10. DOI:10.1103/PhysRevE.100.012316.

11. *Azam F., Yadav S.K., Priyadarshi N.* A comprehensive review of authentication schemes in vehicular ad-hoc network // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 31309–31321.

12. *Новосёлов В.Г., Скатков А.В.* Прикладная математика для инженеров-системотехников. Дискретная математика в задачах и примерах: учебное пособие. Киев: УМК ВО, 1992. 200 с.

COLLABORATIVE STRATEGIES FOR DETECTING INTERFACE VULNERABILITIES OF INFORMATION AND MEASUREMENT NETWORKS OF NTS WITH 5G TECHNOLOGIES

A.V. Skatkov, A.A. Bryukhovetskiy

Federal State Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University»,
RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

An approach to the construction of a strategy for detecting vulnerabilities of information and measurement network interfaces based on decentralized service disciplines based on mutual testing of the states of natural and technical objects (NTO) and systems (NTS) is considered. The proposed approach develops methods for dynamic detection of anomalies in information data flows in intelligent networks, taking into account the features of 5G technologies. The application of the proposed approach is aimed at increasing the reliability of decisions made in a stochastic highly dynamic environment characterized by a rapidly changing network topology, its mobility, spatial density, localization of nodes. For this purpose, a model has been developed that forms virtual collaborations of network nodes and allows moving from processing the variable structure of the network topology to a quasi-permanent one. One of the variants of the network architecture, a graph model of virtual collaborations, is presented, an algorithm for the formation of minimal coverages is given, estimates of the reliability of vulnerability detection are obtained.
Keywords: decentralized processing, node collaborations, graph model, set coverage, decision-making, vulnerability detection

REFERENCES

1. https://nsfocusglobal.com/new-architecture-new-challenges-service-security-issues-in-the-5g-core-network-and-how-to-detect-them/ (July 06, 2022)
2. *Shafi M.* 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. *IEEE Journal on selected areas in communications*, 2017, Vol. 35(6), pp. 1201–1221.
3. *Rupprecht D., Dabrowski A., Holz T., Weippl E., and Pöpper C.* On security research towards future mobile network generations. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, Vol. 20(3), pp. 2518–2542.
4. *Chopra G., Jain S., and Jha R.K.* Possible security attack modeling in ultradense networks using high-speed handover management. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, Vol. 67(3), pp. 2178–2192.
5. *Engoulou R.G., Bellaïche M., Pierre S., and Quintero A.* VANET security surveys. *Computer Communications*, May 2014, Vol. 44, pp. 1–13.
6. *Chen J.* Service-oriented dynamic connection management for software-defined internet of vehicles. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, Oct. 2017, Vol. 18(10), pp. 2826–2837.
7. *Fatih S. and Sevil S*. A Survey of Attacks and Detection Mechanisms on Intelligent Transportation Systems:VANETs and IoV. *Ad Hoc Networks*, march 2017, No. 61, pp. 1570–8705.
8. *Skatkov A.V., Bryuhoveckij A.A., Doronina Yu.V., Moiseev M.D., Skatkov I.A., and Chengar O.V.* Adaptivnoe obnaruzhenie uyazvimostej interfejsov bespilotnyh transportnyh sredstv (Adaptive vulnerability detection of unmanned vehicle interfaces). Simferopol: Arial, 2020, 352 p.
9. *Skatkov A.V., Moiseev D.V., Bryuhoveckij A.A., Doronina YU.V., Skatkov I.A., and Shevchenko V.I.* Strukturnyj sintez kanalov informacionnyh obmenov dlya bespilotnyh transportnyh sredstv (Structural synthesis of information exchange channels for unmanned vehicles). Simferopol: Arial, 2020, 320 p.
10. *Skanda V.* Cyberphysical risks of hacked internet-connected vehicles. *Physical reviewe*, July 2019, Vol. 100(1), pp. 1–10. DOI:10.1103/PhysRevE.100.012316.
11. *Azam F., Yadav S.K., and Priyadarshi N.* A comprehensive review of authentication schemes in vehicular ad-hoc network. *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 31309–31321.
12. *Novosyolov V.G. and Skatkov A.V.* Prikladnaya matematika dlya inzhenerov-sistemotekhnikov. Diskretnaya matematika v zadachah i primerah (Applied mathematics for systems engineers. Discrete mathematics in problems and examples). Kiev: UMK VO, 1992, 200 p.

УДК 574.5+561.26:477.75(556.5)+004.65 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-97-105

БАЗА ДАННЫХ ОЧЕРТАНИЙ СТВОРОК ДИАТОМОВЫХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

А.М. Лях[1], С.Г. Лелеков[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] Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: p1859@yandex.ru

Диатомовые водоросли – широко распространенные микроскопические водные автотрофы, покрытые кремниевым панцирем. Створки диатомовых – это крупные хорошо заметные элементы панциря. Очертания створок используют для решения многих задач: идентификации видов, построения геометрических моделей панцирей, оценки состояния водоемов и в качестве шаблонов для систематизации изображений микроводорослей. Для решения этих задач необходимы образцы характерных форм створок. В работе представлена структура базы данных для хранения очертаний створок диатомовых, рассмотрены способы математического описания контуров створок и приведены сценарии взаимодействия с базой данных. База данных доступна по адресу: *3d-microalgae.org/diatoms/valve-shapes*

Ключевые слова: анализ форм, морфологическая изменчивость, тератологические формы, база силуэтов, классификация, визуальный индекс, диатомовые водоросли

Поступила в редакцию: 08.08.2022. После доработки: 05.09.2022.

Введение. Диатомовые водоросли – это распространенные микроскопические одноклеточные водные фототрофы, окруженные кремниевым панцирем. Строение панциря диатомовых подобно устройству чашки Петри: он также состоит их двух частей, одна из которых накрывает другую. «Донышки» панциря называют створками (рис. 1).

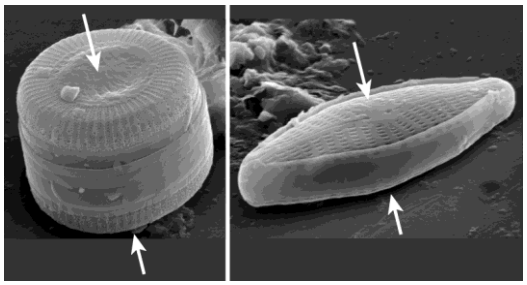


Рис. 1. Кремниевые панцири диатомовых водорослей под электронным микроскопом; стрелки указывают на створки
Fig. 1. Diatom siliceous frustules under an electron microscope; arrows point to valves

Цель работы заключалась в разработке базы данных для хранения очертаний (форм) створок диатомовых водорослей. *Задачи работы* включали разработку структуры базы данных, способов представления и хранения форм створок и описание сценариев взаимодействия с базой данных.

Базы контуров биологических объектов активно используют для обучения систем искусственного интеллекта автоматической классификации, распознаванию и опознанию объектов. Среди этих баз всего лишь несколько содержат контуры частей живых организмов, например отолитов рыб [1] или листьев растений [2]. База с очертаниями створок диатомовых водорослей в настоящее время отсутствует.

Для чего используют контуры створок диатомовых. Очертания створок диатомовых применяют для решения разнообразных задач: таксономической идентификации диатомовых, классификации форм и геометрического моделирования их панцирей, экологического мониторинга водоемов, систематизации изображений микроводорослей.

Так, для корректной таксономической идентификации организмов важно выделить такую совокупность признаков, которая позволит четко разделить множество особей на отдельные таксоны [3]. В диатомологии львиную долю диагностических признаков составляют морфологические особенности створок. Саму форму створок также используют в качестве диагностического признака, однако она относится к слабым признакам. Такой признак сам по себе не позволяет выделить единственный вид или род (за редким исключением видов с уникальными формами), но, в совокупности с другими признаками, может оказать решающее значение на результат.

Классификация организмов по форме подразумевает, что при помощи математических методов контуры организмов преобразуют в наборы чисел, которые сравнивают друг с другом при помощи выбранной функции сходства. После выделяют классы организмов с похожими формами. Чтобы классы совпали с реальными таксонами, необходимо заранее подготовить образцы характерных форм представителей каждого таксона и использовать их при классификации в качестве типовых образцов.

Другая задача, в которой применяются очертания створок, заключается в точной оценке объемов и площадей поверхности оболочек микроводорослей [4, 5]. Для этого используют геометрические модели подобные трехмерной форме микроорганизмов. Классическая модель представляет собой совокупность стандартных геометрических тел: цилиндров, конусов, полусфер, призм [4, 6]. Такая модель плохо аппроксимирует форму, что снижает точность оценки морфометрических параметров. В усовершенствованном методе правильную трехмерную модель панциря диатомовой конструируют из очертаний створок и сечений панциря плоскостями (рис. 2) [5]. Размеры модели подгоняют к размерам моделируемого организма, после полагают, что объем и площадь поверхности модели соответствует таковым значениям микроводоросли. Полученные объемы и площади поверхностей используют для решения ряда гидробиологических, экологических и общебиологических задач. Так как формы створок многих видов диатомовых совпадают, то заранее созданная база типичных очертаний створок ускорит процесс построения моделей и оценки морфометрических параметров.

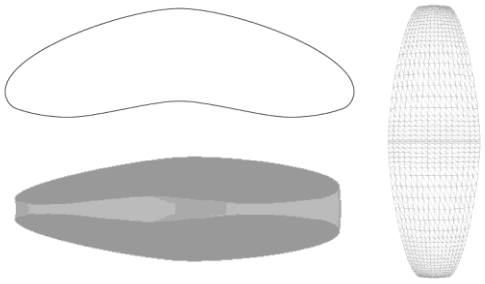


Рис. 2. Контур створки диатомовой использован для создания 3д-модели панциря
Fig. 2. The valve contour of a diatom is used for constructing 3d-model of a frustule

Экологическую оценку состояния водоемов часто выполняют на основе таксономического состава и морфометрических характеристик диатомовых водорослей [7, 8]. При этом рекомендуют оценивать обилие аномальных форм створок диатомовых [9]. Для этого следует знать форму нормальных створок, то есть иметь набор образцов характерных форм.

Наконец, очертания створок применяют для упорядочивания (индексирования) фотографий диатомовых [10]. Для этого каждой сфотографированной створке сопоставляют форму из заданного набора. В результате форма становится шаблоном (визуальным индексом), позволяющим выбрать фотографии похожих на нее створок. Такой индекс позволяет пользователю работает с образом формы, а не с ее описанием.

Все вышеизложенное подчеркивает необходимость создания базы очертаний створок диатомовых микроводорослей.

Описание плоской формы. Способы описания плоских форм объектов делятся на качественные и количественные. К качественным относится словесное описание формы. Оно может быть достаточно подробным или излишне кратким. Подробное описание упомина-

ет мельчайшие детали строения границы объекта и призвано вызвать у читающего, по возможности, точный образ формы. Для этого в тексте рекомендуют использовать базовые лингвистические характеристики форм [11], понятные большинству читателей. Краткое описание характеризует форму одним-тремя словами. В кратком описании форму либо сравнивают с общеизвестными аналогами, например, геометрическими фигурами: круглая, овальная, прямоугольная, треугольная, либо описание составляют из терминов, суть которых раскрывается в специализированных словарях, например [12].

Несмотря на это, словесные описания форм остаются достаточно субъективными. Их сложно сравнить друг с другом, так как всегда есть вероятность неверной трактовки фразы и ошибочных выводов о совпадении отличающихся форм. Поэтому формы стараются описать количественными показателями.

Количественные характеристики форм очень разнообразны [13, 14]. Для количественного анализа форм требуют, чтобы числовые характеристики форм были инвариантными к положению, повороту и размеру исходного объекта. Такие инвариантные характеристики называют *дескрипторами формы* (англ., *shape descriptors*), так как считается, что их значения зависят только от формы объекта [13, 15]. Для вычисления дескриптора формы достаточно иметь оцифрованный (векторный) контур границы объекта. Поэтому в базе данных мы, в первую очередь, храним такие контуры.

Для математического описания контура створок мы используем кубические кривые Безье, которые гладко стыкуются друг с другом[1] (рис. 3).

Кривые Безье выбраны из следующих соображений. Во-первых, инструмент для построения кривых Безье есть в векторных редакторах, то есть де факто кривые стали стандартом для построения векторных линий. Во-вторых, представление контура кривыми Безье компактно, потому что каждую точку кубической кривой Безье можно найти по координатам четырех управляющих вершин. Следовательно, для описания замкнутой линии, состоящей из n кривых Безье, потребуются координаты всего лишь $3n$ управляющих вершин. Наконец, кубическая кривая Безье входит в подмножество команд языка масштабируемой векторной графики (рус. *свг,* англ. *svg – scalable vector graphics*), который является одним из стандартных способов представления плоских векторных объектов. Таким образом, вместо множества координат точек контура мы используем небольшой набор координат вершин кривых Безье, которые кодируем в формате свг и записываем в файл. В результате каждому контуру соответствует отдельный свг-файл.

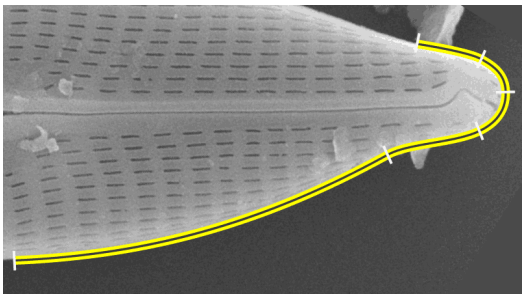


Рис. 3. Контур створки состоит из гладко соединенных кубических кривых Безье
Fig. 3. The valve contour consists of smoothly connected cubic Bezier curves

В базе данных мы также храним числовые дескрипторы формы. В качестве базовых дескрипторов использованы коэффициенты эллиптического преобразования Фурье [15]. Их несложно вычислить, они позволяют строить усредненные формы и достаточно хорошо разделяют отличающиеся формы [16].

Для построения контура створки мы используем фотографии диатомовых водорослей. Из-за индивидуальной изменчивости, влияния окружающей среды и иных причин сфотографированные створки диатомовых чаще всего не выглядят правильно симметричными. Это известный факт, наблюдаемый у всех

[1] При гладком соединении двух кривых Безье образуется кривая без особых точек, имеющая непрерывную производную в каждой точке.

живых организмов: «идеальная симметрия является математической абстракцией, тогда как в природе чаще всего встречаются лишь приблизительно симметричные (псевдосимметричные) системы, об инвариантности которых относительно операций симметрии также можно говорить лишь приблизительно» [17, с. 3].

Псевдосимметрия широко распространена в природе. Ее необходимо учитывать при изучении индивидуальной изменчивости или воздействия среды на морфогенез и онтогенез организмов. Однако наша задача заключается в создании контура типовой створки, символизирующую вид определенного класса форм. Поэтому мы не учитываем псевдосимметричные отклонения и строим правильные симметричные створки.

Идеальные створки обладают зеркальной симметрией, центральной симметрией или симметрией вращения – это все элементы группы точечных симметрий [18]. Для построения створок с данными типами симметрий мы оконтуриваем только часть границы изображения диатомовой: половину, четверть или меньшую часть в зависимости от типа симметрии. Построенную кривую мы дублируем, смещаем или вращаем и объединяем в один контур (рис. 4). Результат помещаем в базу данных.

База данных состоит из четырех таблиц: контуров, дескрипторов контуров, названий контуров и описаний дескрипторов (рис. 5).

Поля таблицы контуров содержат уникальный идентификатор, название свг-файла с контуром и служебную информацию.

Таблица дескрипторов связывает контуры со значениями дескрипторов. Одному контуру может соответствовать несколько дескрипторов. Значения каждого дескриптора хранит отдельная запись таблицы. Значения записаны в json-структуре, в которой ключом является аббревиатура дескриптора. Расшифровка аббревиатур и описание дескрипторов вынесено в другую таблицу.

Некоторые формы створок диатомовых имеют собственные названия: веретеновидная, булавовидная [12]. Они вынесены в отдельную таблицу.

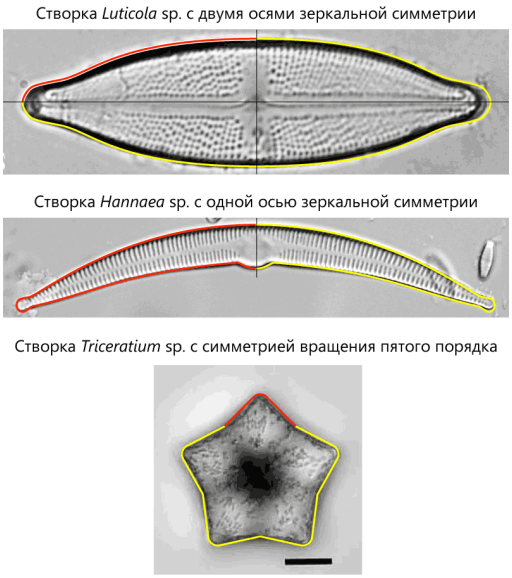


Рис. 4. Для создания симметричного контура, мы обводим только часть границы створки (красную), затем из нее строим полный контур (желтый)
Fig. 4. To create a symmetrical contour, we outline only part of the valve edge (red), then use it to construct a full contour (yellow)

Как видно, структура БД не привязана только к формам диатомовых водорослей и может хранить описания контуров любых объектов.

Кроме упомянутых таблиц БД также включает таблицу с идентификаторами внешних ресурсов, которые содержат фотографии и сведения о фотографиях диатомовых водорослей, и таблицу с группами похожих форм.

Внешние связи. База данных состоит не из абстрактных геометрических фигур, а из идеализированных очертаний реальных створок диатомовых. Каждое очертание створки построено по фотографии диатомовой. Фотографии хранит внешняя база изображений [10], с которой связана база форм.

База изображений является комплексным информационным объектом, который связывает изображения с источниками изображений и названиями таксонов (видов). Она включает как неопубликованные фотографии, так и фотографии, опубликованные в статьях и монографиях.

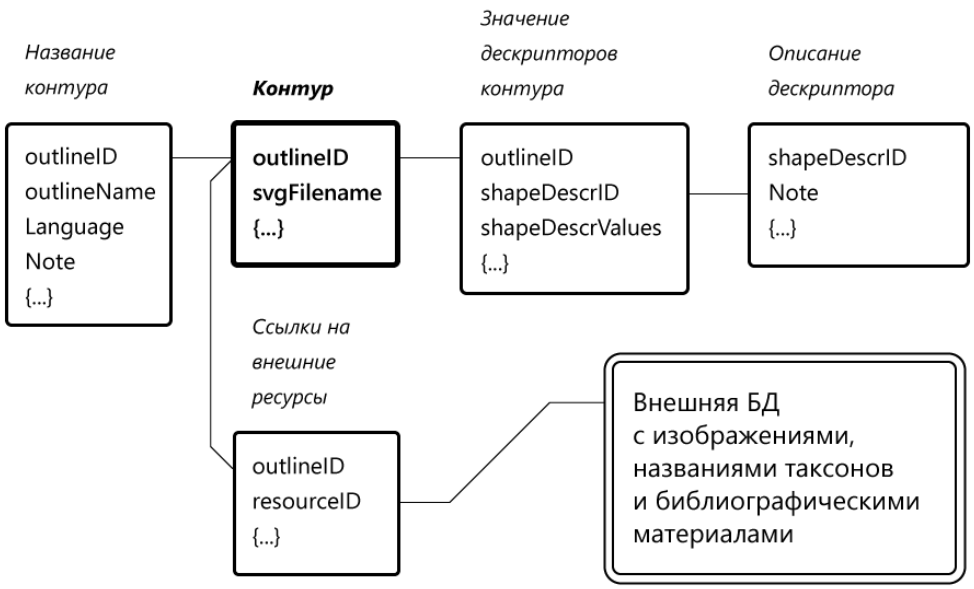


Рис. 5. Структура базы очертаний створок диатомовых
Fig. 5. The structure of the database with diatom valve outlines

Для неопубликованных фотографий известны имена исследователей и контактная информация, для вторых – выходные данные публикаций и номера иллюстраций. Эти сведения характеризуют источник изображений. Для части фотографий также известны видовые названия диатомовых. Таким образом внешняя база данных каждому оцифрованному контуру сопоставляет изображение диатомовой, сведения об источнике изображения и, в некоторых случаях, название вида.

В качестве базы изображений мы используем данные *Архипа* – библиотеки опубликованных изображений микроводорослей (3d-microalgae.org/arxip). Архип хранит опубликованные фотографии, которые соотнесены с названиями видов и выходными данными публикаций, и предоставляет дистанционный доступ к собранному материалу [19].

Дистанционный доступ к базе данных контуров обеспечивает специальный интерфейс. Он позволяет получить сведения о форме по ее уникальному идентификатору или названию, если у формы есть название. Сведения включают описание кривой, ограничивающей створку, и дополнительные данные. В зависимости от запроса, результирующая кривая будет представлена:

- последовательностью координат управляющих вершин кубических кривых Безье, закодированных в формате свг в команде path;
- последовательностью координат точек, полученных путем дискретизации кривых Безье с помощью алгоритма адаптивного разбиения [20];
- значениями первых гармоник эллиптического преобразования Фурье, которые не зависят от положения, размера и поворота формы [16].

Помимо одной формы, система может вернуть перечень всех форм.

Расширенный запрос к базе данных также вернет:

- ссылку на ресурс с изображением створки диатомовой, на основе которого построен контур;
- список видов диатомовых, формы створок которых похожи на заданную форму.

Для выполнения расширенного запроса система обращается к внешней базе данных, а также использует таблицу с группами похожих форм.

Похожие формы. В процессе наполнения базы возникает ситуация, когда новая форма похожа на уже имеющиеся (рис. 6).

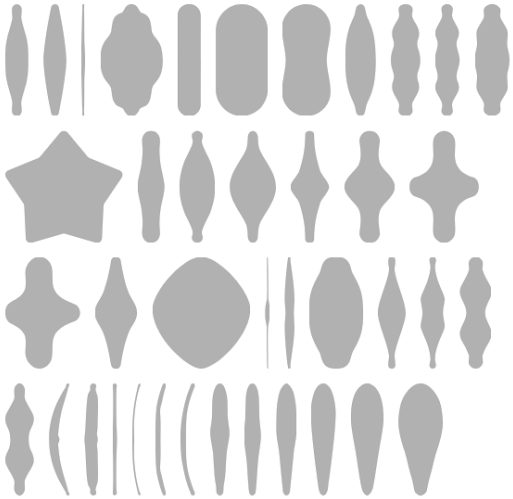


Рис. 6. Формы многих створок похожи
Fig. 6. The shapes of many valves are similar

В этом случае мы все равно сохраняем ее в базе данных, так как любая форма несет информацию о морфологической или онтогенетической изменчивости вида организма. Если эта форма похожа на другие, то это значит, что такой-то вид в процессе развития принимает форму, которая встречается у других видов. Это необходимо знать для понимания закономерностей адаптаций организмов к схожим условиям обитания, корректной идентификации видов, построения пространств форм (морфопространств) и решения иных задач.

С другой стороны похожие формы затрудняют построение визуального индекса изображений, так как в этом случае непонятно, какую из форм использовать в качестве типового образца[2]. Для решения этой проблемы необходим алгоритм кластеризации форм по степени схожести и выбора характерного экземпляра из каждого кластера. На данный момент такой алгоритм не реализован. Но он может функционировать наподобие известных алгоритмов классификации следующим образом: при помещении формы в базу данных алгоритм вычисляет ее числовые дескрипторы, далее с помощью функции схожести оценивает сходство дескрипторов с элементами имеющихся классов и выбирает наиболее похожий класс, либо создает новый. Характерный экземпляр каждого класса алгоритм выбирает похожим образом, но среди элементов класса, либо его может указать администратор базы данных.

Пример использования базы данных. *Визуальный индекс изображений.* В процессе работы на сканирующем электронном микроскопе один из авторов собрал большую коллекцию фотографий диатомовых микроводорослей, которые необходимо упорядочить. «Один из эффективных приемов [упорядочивания] большого числа объектов заключается в делении объектов на группы и последующей замене группы на единственный объект …, позволяющим выбрать все объекты этой группы» [10, с. 39]. Типовые образцы контуров створок помогают частично решить данную задачу.

Для этого был написан скрипт, который перебирает фотографии из указанного источника (таблицы БД или каталога файловой системы), по одной показывает пользователю и предлагает соотнести изображение створки с одним из шаблонов. Выбор шаблона генерирует json-файл, с записью о том, что изображенная створка попадает в указанный класс форм. В конечном итоге каждое изображение пользователь относит к определенному классу и эти сведения сохраняются в json-файлах.

Визуальный определитель диатомовых. Изображения створок привязаны к конкретным видам диатомовых. Поэтому выбор образа формы и последующий отбор створок с подобной формой приводит к отбору видов, представители которых имеют указанную форму. Описанный процесс есть не что иное, как типичный шаг работы таксономического определителя [3], в котором форма створки выполняет роль морфологического признака, варианты которого прописаны в базе данных. Таким образом, таблица с очертаниями створок в данном контексте выступает в качестве элемента базы данных интерактивного определи-

[2] Такие же трудности возникают у систематиков при выделении типовых экземпляров видов организмов: голотипов, лектотипов, паратипов, только при этом исследователи учитывают не одну форму, а совокупность признаков.

теля. Естественно, что подобный определитель должен учитывать многие другие признаки диатомовых.

Выводы. Впервые разработана база данных для хранения очертаний створок диатомовых микроводорослей. Структура базы не привязана только к формам створок, а может хранить контуры любых биологических объектов.

Контур – это замкнутая плоская кривая, которая построена из кубических кривых Безье гладко сопряженных друг с другом. Кривая описана на языке масштабируемой векторной графики (свг) в виде последовательности координат управляющих вершин кривых Безье. Такой формат позволяет работать с контуром в любом редакторе векторной графики, визуализировать контур на вебстраницах и беспрепятственно обмениваться контурами с другими системами.

Контуры передают идеализированные симметричные очертания створок диатомовых, построенные по фотографиям реальных микроводорослей. Такое представление позволяет исключить индивидуальную псевдосимметрию форм организмов и сосредоточиться на характерной форме представителей морфогруппы.

Помимо контурной кривой, база данных хранит числовое описание контура в виде вектора инвариантных дескрипторов. В качестве последних использованы коэффициенты эллиптического преобразования Фурье. Такое представление дает возможность выполнять анализ и классификацию форм при помощи разнообразных математических методов.

Разработанный интерфейс позволяет извлечь из базы данных описание конкретной формы створки, перечень всех форм, сведения об источниках фотографий, использованных для построения контуров, и о видовых названиях диатомовых с указанной формой створок.

База очертаний створок диатомовых открыта и общедоступна по адресу: *3d-microalgae.org/diatoms/valve-shapes*

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».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tray E., Leadbetter A., Meaney W., Conway A., Kelly C., Maoileidigh N. O., de Eyto E., Moran S., Brophy D.* An open-source database model and collections management system for fish scale and otolith archives // Ecological Informatics. 2020. Vol. 59. 101115.

2. *Ledford H.* Massive database of 182,000 leaves is helping predict plants' family trees // Nature. 2017. Vol. 547. P. 147.

3. *Лелеков С.Г., Лях А.М.* Метод выбора последовательности признаков в таксономических экспертных системах // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017: сб. статей по материалам науч.-практ. конф. с междунар. участием. Севастополь: СевГУ, 2017. С. 759–763.

4. *Брянцева Ю.В., Лях А.М., Сергеева А.В.* Расчет объемов и площадей поверхности одноклеточных водорослей Черного моря. Севастополь: НАН Украины. Институт биологии южных морей. 2005. 25 с.

5. *Лях А.М.* Компьютерная программа 3D-Microalgae для вычисления объема и площади поверхности оболочки микроводорослей // Современная фитоморфология. 2012. Т. 1. С. 89–91.

6. *Sacca A.* Methods for the estimation of the biovolume of microorganisms: a critical review // Limnology and Oceanography: Methods. 2017. Vol. 15. P. 337–348.

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

8. *Wu N., Dong X., Liu Y., Wang C., Battrup-Pedersen A., Riis T.* Using river microalgae as indicators for freshwater biomonitoring: review of published research and future directions // Ecological Indicators. 2017. Vol. 81. P. 124–131.

9. *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, № 8. P. 1675–1753.

10. *Лях А.М.* База данных библиотеки цифровых изображений живых организмов // Электронные информационные системы. 2021. № 3 (30). С. 33–42.

11. *Гилярова К.А.* Языковая концептуализация формы физических объектов: автореф. дис. … канд. филол. наук. М.: МГУ, 2002. 26 с.

12. *Гололобова М.А., Гогорев Р.М., Лях А.М., Дорофеюк Н.И.* Основные формы створок диатомовых водорослей: терминология. I. Формы створок, симметричные относительно апикальной оси, и формы с радиальной симметрией // Новости систематики низших растений. 2022. Т. 56, № 1. С. 29–54.

13. *Flusser J., Suk T., Zitova B.* Moments and moment invariants in pattern recognition. Willey, 2009. 296 p.

14. *Waldchen J., Mader P.* Plant species identification using computer vision techniques: a systematic literature review // Archives of Computational Methods in Engineering. 2017. Vol. 25. P. 507–543.

15. *Haines J., Crampton J.S.* Improvements to the method of Fourier shape analysis as applied in morphometric studies // Palaeontology. 2000. Vol. 43. № 4. P. 765–783.

16. *Лях А.М.* Анализ биологических форм на основе согласованных коэффициентов эллиптического преобразования Фурье // Наука Юга России. 2019. Т. 15, № 4. С. 63–70.

17. *Нижегородцев А.А.* Псевдосимметрия растительных объектов как биоиндикационный показатель: теоретическое обоснование, автоматизация оценок, апробация: автореф. дис. … канд. биол. наук. Н. Новгород, 2010. 24 с.

18. *Гелашвили Д.Б., Чупрунов Е.В., Марычев М.О., Сомов Н.В., Широков А.И., Нижегородцев А.А.* Приложение теории групп к описанию псевдосимметрии биологических объектов // Журнал общей биологии. 2010. Т. 71, № 6. С. 497–513.

19. *Лях А.М.* Архив опубликованных фотографий диатомовых микроводорослей // Вопросы современной альгологии. 2022. № 1 (28). С. 86–93.

20. *Шеманарев М.* Адаптивное разбиение кривых Безье. – URL: https://rsdn.org/article/multimedia/bezier.xml (дата обращения: 01.09.2022).

THE DATABASE OF THE DIATOM VALVE OUTLINES

A.M. Lyakh[1], S.G. Lelekov[2]

[1]A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
RF, Sevastopol, Nakhimov Av., 2
[2]Sevastopol State University,
RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

Diatoms are widespread microscopic aquatic autotrophs covered by a siliceous frustule. The diatom vales are large conspicuous elements of frustule. The valve outlines are used for solving different tasks, such as species identification, construction of frustule geometric models, assessment of the status of water bodies, and as templates for microalgae images systematization. To solve these tasks, the samples of characteristic valve shapes are needed. In the paper we present the structure of the database for keeping diatom valve outlines and give the scenarios for interaction with the database. The database is available at: *3d-microalgae.org/diatoms/valve-shapes*

Ключевые слова: shape analysis, morphological variability, teratological shapes, silhouettes database, classification, visual index, diatoms.

REFERENCES

1. *Tray E., Leadbetter A., Meaney W., Conway A., Kelly C., Maoileidigh N.O., de Eyto E., Moran S., and Brophy D.* An open-source database model and collections management system for fish scale and otolith archives. *Ecological Informatics*, 2020, Vol. 59, 101115.

2. *Ledford H.* Massive database of 182,000 leaves is helping predict plants' family trees. *Nature,* 2017, Vol. 547, pp. 147.

3. *Lelekov S.G. and Lyakh A.M.* Metod vybora posledovatelnosti priznakov v taksonomicheskikh ekspertnykh sistemakh (The method for selecting a sequence of characters in taxonomic expert systems). *Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost – 2017.* Collection of articles based on the materials of the scientific-practical conference with international participation. Sevastopol: SevGU, 2017, pp. 759–763.

4. *Bryantseva Yu.V., Lyakh A.M., and Sergeeva A.V.* Raschet obyemov i ploschadey poverkhnosti odnokletochnykh vodorosley Chernogo morya (Calculation of biovolumes and surface areas of Black Sea microalgae). Sevastopol: NAS of Ukraine. Institute of Biology of the Southern Seas, 2005, 25 p.

5. *Lyakh A.M.* Kompyuternaya programma 3D-Microalgae dlya vychisleniya obyema i ploschadi poverkhnosti obolochki mikrovodorosley (3D-Microalgae software used for the estimation of microalgae biovolumes and surface areas). *Sovremennaya Fitomorfologiya,* 2012, Vol. 1, pp. 89–91.

6. *Sacca A.* Methods for the estimation of the biovolume of microorganisms: a critical review. *Limnology and Oceanography: Methods,* 2017, Vol. 15, pp. 337–348.

7. *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). *Algologiya,* 1999, Vol. 9, No. 3, pp. 89–103.

8. *Wu N., Dong X., Liu Y., Wang C., Battrup-Pedersen A., and Riis T.* Using river microalgae as indicators for freshwater biomonitoring: review of published research and future directions. *Ecological Indicators*, 2017, Vol. 81, pp. 124–131.

9. *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, No. 8, pp. 1675–1753.

10. *Lyakh A.M.* Baza dannykh biblioteki tsifrovykh izobrazheny zhivykh organizmov (Living organisms digital image library database). *Electronic Information Systems,* 2021, No. 3 (30), pp. 33–42.

11. *Gilyarova K.A.* Yazykovaya kontseptualizatsiya formy fizicheskikh obyektov: Avtoref. diss. kand. filol. nauk (Linguistic conceptualization of the form of physical objects. Cand. phylol. sci. thesis abstract). Moscow: MGU, 2002, 26 p.

12. *Gololobova M.A., Gogorev R.M., Lyakh A.M., and Dorofeyuk N.I.* Osnovnye formy stvorok diatomovykh vodorosley: terminologiya. I. Formy stvorok, simmetrichnye otnositelno apikalnoy osi, i formy s radialnoy simmetriey (The main valve shapes of diatoms: terminology. I. Valve shapes symmetrical to the apical axis and valve shapes with radial symmetry). *Novosti sistematiki nizshikh rasteny,* 2022, Vol. 56, No. 1, pp. 29–54.

13. *Flusser J., Suk T., and Zitova B.* Moments and moment invariants in pattern recognition. Willey, 2009, 296 p.

14. *Waldchen J. and Mader P.* Plant species identification using computer vision techniques: a systematic literature review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017, Vol. 25, pp. 507–543.

15. *Haines J. and Crampton J.S.* Improvements to the method of Fourier shape analysis as applied in morphometric studies. *Palaeontology,* 2000, Vol. 43, No. 4, pp. 765–783.

16. *Lyakh A.M.* Analiz biologicheskikh form na osnove soglasovannykh koeffitsientov ellipticheskogo preobrazovaniya Furye (Analysis of biological shapes on the basis of coordinated coefficients of elliptic Fourier transformation). *Nauka Yuga Rossii,* 2019, Vol. 15, No. 4, pp. 63–70.

17. *Nizhegorodtsev A.A.* Psevdosimmetriya rastitelnykh obyektov kak bioindikatsionny pokazatel: teoreticheskoe obosnovanie, avtomatizatsiya otsenok, aprobatsiya: Avtoref. diss. kand. biol. nauk (Pseudosymmetry of plant objects as a bioindicator: theoretical justification, automation of estimations, validation. Cand. boil. sci. thesis abstract). Nizhny Novgorod, 2010, 24 p.

18. *Gelashvili D.B., Chupruno E.V., Marychev M.O., Somov N.V., Shirokov A.I., and Nizhegorodtsev A.A.* Prilozhenie teorii grupp k opisaniyu psevdosimmetrii biologicheskikh obyektov (Application of the group theory to description of biological objects pseudosymmetry). *Zhurnal Obshey Biologiyi,* 2010, Vol. 71, No. 6, pp. 497–513.

19. *Lyakh A.M.* Arkhiv opublikovannykh fotografy diatomovykh mikrovodorosley (An archive of the published photographs of diatoms). *Voprosy sovremennoy algologii,* 2022, No. 1 (28), pp. 86–93.

20. https://rsdn.org/article/multimedia/bezier.xml (September 1st, 2022).

УДК 681.121.89.082.4 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-106-116

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВЕКТОРНОМ ОДНОЛУЧЕВОМ АКУСТИЧЕСКОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ

А.Н. Греков, Н.А. Греков, С.С. Пелюшенко

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

Рассмотрены акустические измерители скорости и направления течения из серии ИСТ, которые могут встраиваться в различные измерительные системы. Проведено моделирование профиля течения в измерительной трубе в зависимости от скорости набегающего потока. Разработан метод измерения, в котором используется время прохождения повторных отраженных от преобразователей акустических сигналов, что позволяет учитывать временные аппаратные задержки и изменение длины измерительной базы, влияющие на определение скорости звука и течения, при этом повышается точность измерения параметров скорости звука при одновременном измерении скорости течения и температуры для жидких сред с различной плотностью.

Ключевые слова: скорость звука, профиль скорости течения, погрешность, моделирование, измерение, акустический прибор

Поступила в редакцию: 20.07.2022. После доработки: 30.08.2022.

Введение. Основные требования к гидрологическим акустическим измерителям течений – это универсальность прибора (способность работать в морских и речных условиях), а также преемственность методик измерения и постановок приборов на гидроузлах, которые формировались десятилетиями. Поэтому без учета этих требований корректно стыковать результаты новых измерений с архивными базами данных окажется невозможным из-за различий динамических характеристик, временного и пространственного усреднения.

Учитывая вышеизложенные требования, взамен гидрометрических вертушек, выпускаемых в России, или аналогичных – выпускаемых за рубежом Valeport-106, -108, -308 (гидрологические вертушки), были разработаны акустические измерители скорости течения серии ИСТ [1, 2], которые предназначены для измерения скорости течения, направления течения, температуры и гидростатического давления (глубины) воды в любых водотоках с берега, береговых сооружений, мостов и плавсредств. Прибор векторного типа ИСТ-1М был разработан и изготовлен на базе существующего прибора ИСТ-1, технические характеристики и область применения которого опубликованы в работах [3, 4]. ИСТ-1М кроме измерения скорости и направления течения, температуры и глубины, имеет возможность измерять не только углы наклона прибора, но и, в отличие от зарубежных аналогов, собственные движения по показаниям установленных в них акселерометров.

Разработанная серия акустических приборов ИСТ может встраиваться в измерительные системы на научно-исследовательских судах; судах наблюдений для проведения регулярных метеорологических или океанографических измерений; автономных подводных аппаратах для проведения обследований и океанографических исследований; аппаратах с переменной глубиной буксировки – несущие большое количество датчиков, анализаторов и устройств для отбора проб; заякоренных буях, которые размещаются на континентальном шельфе, устройствах, заякоренных на морском дне, которые используются для мониторинга процессов вблизи морского дна; дрейфующих буях (дрифтеры) для коррекции относительного вектора скорости течения от воздействия ветровой компоненты; притопленных буях, кото-

рые представляют собой автономные платформы, свободно дрейфующие на глубине и всплывающие время от времени для передачи данных.

Точность этих средств измерения ограничена влиянием на результат измерения временных задержек сигналов в передающих и приемных трактах, включая задержки в акустических преобразователях, которые существенно зависят от температуры и давления, и изменяются со временем. Кроме того, в результат измерения входит скорость звука в среде, которую определяют с ограниченной точностью из-за тех же задержек сигналов в приемо-передающих трактах.

В связи с тем, что в однолучевом акустическом измерителе скорости течения, скорость распространения звука в водной среде взаимосвязана со скоростью течения, также необходимо рассмотреть и измерение скорости течения.

Основная часть. Известно, что ультразвуковая волна несет информацию о скорости течения, когда она распространяется в текучей жидкости. Скорость можно определить, измерив время распространения ультразвуковой волны. Принцип используемых сегодня ультразвуковых измерителей со временем прохождения был основан на том, что скорость равномерна на пути распространения ультразвуковой волны. Измерительный канал скорости звука и течения является каналом акустического типа с двумя пьезопреобразователями (*A*, *B*), расположенными в измерительной трубе прибора с диаметром *D* (рис. 1).

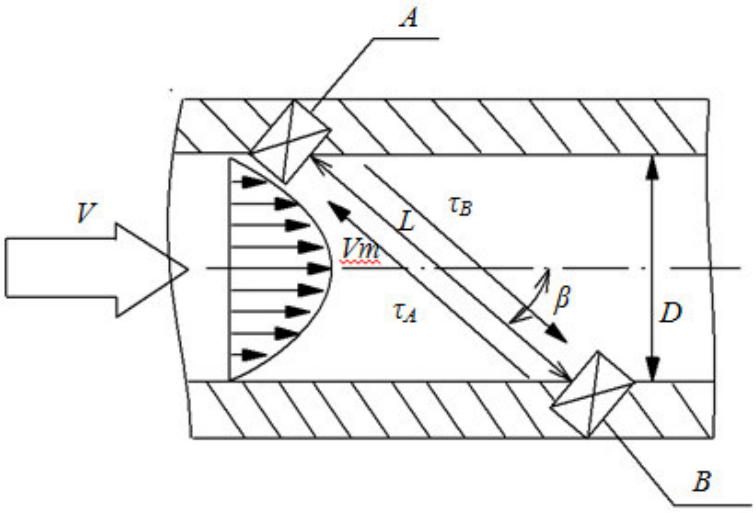


Рис. 1. Функциональная схема измерительной трубы акустического прибора
Fig. 1. Functional diagram of the measuring tube of an acoustic instrument

Сформированный электрический импульс последовательно подается на пьезопреобразователи *A* и *B*, где преобразуется в акустический сигнал, который проходит через жидкость и вновь принимается этими пьезопреобразователями.

Учитывая, что пьезопреобразователи располагаются в канале диаметром *D* под некоторым углом β, уравнения для времени распространения ультразвуковых импульсов по направлению движения жидкости τ_A и против него τ_B запишутся как

$$\tau_A = \frac{D/\sin\beta}{C + V\cos\beta}, \quad \tau_B = \frac{D/\sin\beta}{C - V\cos\beta}, \qquad (2)$$

где *V* – скорость потока жидкости; *C* – скорость звука в воде.

С некоторыми допущениями, а, именно, что профиль скорости течения в акустическом измерительном канале однороден и, исключая временные задержки и скорость распространения звука *C*, с учетом, что *C*>>*V* из выражения (2), окончательно упрощенное выражение для определения скорости течения можно записать как

$$V = \frac{D\left(\tau_A - \tau_B\right)}{\tau_A \tau_B \sin 2\beta}. \qquad (3)$$

Однако хорошо известно, что профиль скорости течения в акустическом измерительном канале неоднороден как при ламинарном, так и при турбулентном течении [5–7]. Анализ известных работ [8] показал, что существует ограниченное количество доступной информации о влиянии профиля скорости на неопределенность измерения. Iooss B. и др. в [9] доказали, что скорость потока завышена из-за предположения о равномерной скорости распределения, а поправочный коэффициент получается эмпирически по результатам численного моделирования для полностью развитой турбулентности. Hui Zhang и др. в [10] дал поправочный коэффициент для переходной области с числом Рейнольдса в диапазоне 2000–20000 на основе результатов эксперимента Particle. Недостаточно исследован поправочный коэффициент для времени прохождения путем теоретического анализа. В статье [11] теоретически и экспериментально рассмотрено влияние профилей скорости поперек акустического измерительного канала на время распространения ультразвуковой волны. Предложены теоретические поправочные коэффициенты для повышения точности измерений. Для ламинарного потока поправочный коэффициент равен 0,75. Для турбулентного потока поправочный коэффициент зависит от числа Рейнольдса, а экспериментальные результаты показали, что предложенные поправочные коэффициенты хорошо согласуются с теоретическими поправочными коэффициентами и их средняя относительная ошибка определена как 0,976% для ламинарного потока и 0,25% для турбулентного потока.

Воспользоваться этими результатами для нашего случая не представляется возможным, так как в известных работах не учитывается влияние конфузора, ограниченность длины измерительного канала и косоструйность течения. Отметим, что измерительный акустический канал приборов ИСТ отличается своей особенностью, которая заключается в том, что помимо измерительной трубы, имеющей определенный внутренний диаметр и привязанный к габаритам всего прибора, еще имеется конфузор, обеспечивающий малое лобовое сопротивление и хорошую протекаемость в диапазоне скоростей до 5 м/с при внешних давлениях порядка 10 МПа. В совокупности габариты разработанного прибора не превышают размеры механических вертушек, что позволяет использовать его для измерения течений, начиная с глубин 5 см.

Разработка прибора была произведена с использованием пакета программ AutoCAD [12]. На рис. 2 представлен общий вид прибора. Диаметр измерительной трубы и угол раскрытия конфузора для конкретного измерителя определялись в результате моделирования на интегрированных CAD и CAE системах, в частности приложения COSMOSFloWorks пакета SolidWorks [13], которые также использовались для исследования полей скорости течения и давления при обтекании приборов серии ИСТ.

Одно из исследований, проводимых в приложении COSMOSFloWorks пакета SolidWorks с измерителем скорости течения ИСТ-1, это моделирование профиля течения в измерительной трубе и определение погрешности от косоструйности в диапазоне углов от 0° до 30° и сравнение результатов с погрешностями механических вертушек.

Математическая модель расчетной области представляла собой параллелепипед с габаритными размерами $lxbxh$ = 0,5 x 0,4 x 0,4 м^3.

Чтобы оценить точность полученного решения поставленной математической задачи, проводились несколько расчетов на разных расчетных сетках, отличающихся размером и, соответственно, количеством ячеек. Было получено, что, начиная с определенной частоты сетки, решение задачи перестало значимо зависеть от частоты сетки, т.е. вышло на «полку», что указало на то, что необходимая точность решения математической задачи достигнута, так как получена сеточная сходимость решения математической задачи.

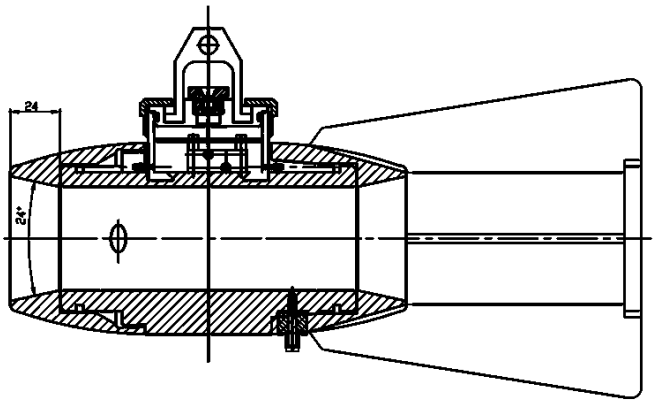


Рис. 2. Общий вид прибора
Fig. 2. General view of the device

Таким образом, моделирование с помощью COSMOSFloWorks заключалось в проведении при фиксированных значениях модели, расчетной области, граничных и начальных условиях выполнения, нескольких расчетов с варьированием расчетной сетки. Определение точности полученного решения.

На рис. 3 представлены результаты моделирования потока в приборе ИСТ-1 при скорости течения 1 м/с. Затем, используя полученные профили скорости течения, определялась средняя скорость течения $\bar{V}$ между двумя пьезоизлучателями A и B, расположенными на расстоянии L:

$$V = \frac{1}{L}\int_0^L V(L)dL.$$

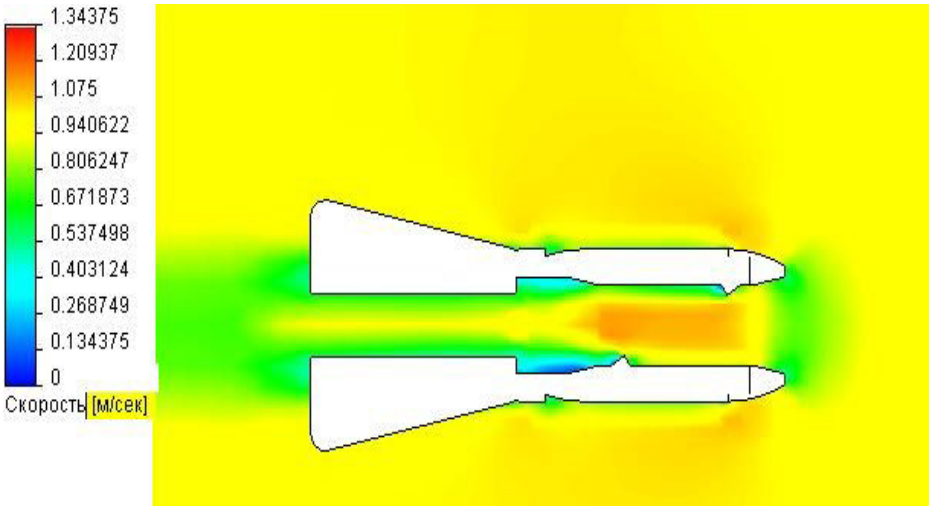


Рис. 3. Поле скорости течения, результаты моделирования потока в приборе ИСТ-1 при скорости течения 1 м/с
Fig. 3. Flow velocity field, results of flow simulation in the IST-1 device at a flow speed of 1 m/s

Для анализа результатов моделирования были построены профили скорости течения в измерительной трубе в зависимости от скорости набегающего потока с дискретностью 1 м/с и максимальной скоростью 5 м/с. На рис. 4 представлен график профиля скорости течения в акустическом канале прибора ИСТ-1 при скорости течения 2 м/с и нулевой косоструйностью.

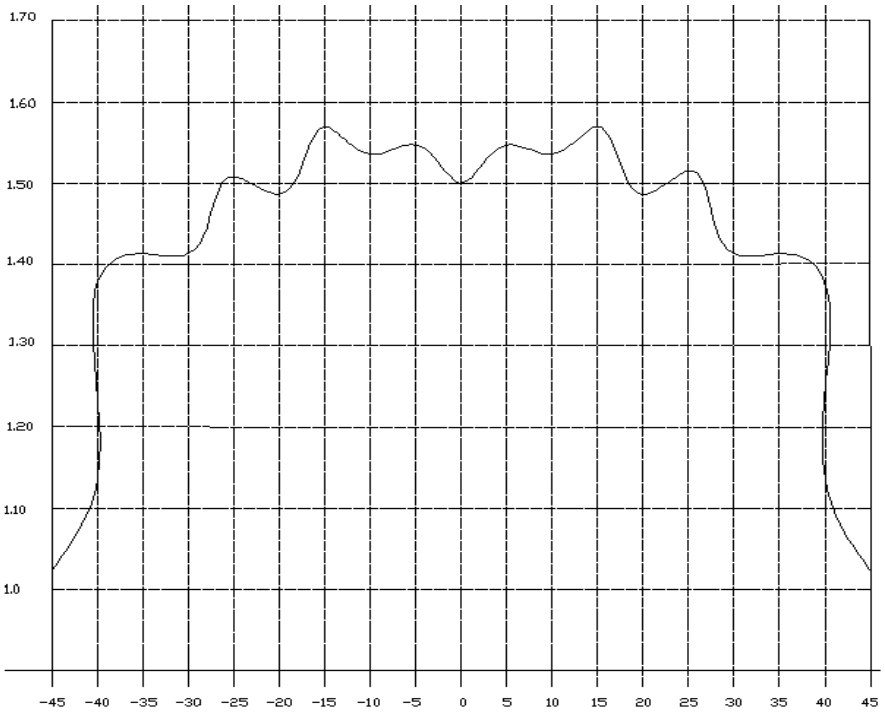


Рис. 4. График профиля скорости течения в акустическом канале прибора ИСТ-1 при скорости течения 2 м/с и нулевой косоструйностью
Fig. 4. Graph of the flow velocity profile in the acoustic channel of the IST-1 instrument at a flow rate of 2 m/s and zero skew

Неравномерность профиля скорости течения (см. рис. 4) в измерительном канале прибора вызвана ограниченным сечением гидролотка, стенки которого при моделировании были расположены на расстоянии 0,15 м друг от друга. При увеличении сечения до 0,5 м пики на диаграмме уменьшались и для открытого бассейна не проявлялись.

Далее, изменяя положение прибора относительно вектора скорости набегающего потока в горизонтальной и вертикальной плоскости с дискретностью 5°, строились профили скоростей течения в измерительном канале прибора. На рис. 5 представлено поле скорости течения, результаты моделирования потока в приборе ИСТ-1 при скорости течения 1 м/с.

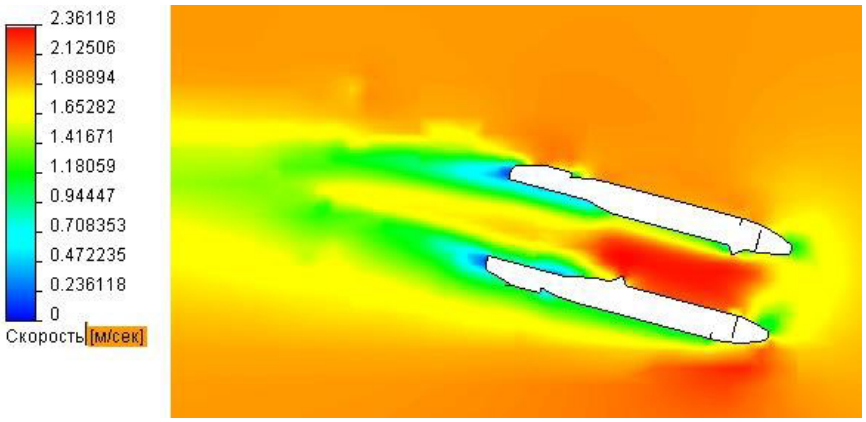


Рис. 5. Результаты моделирования потока скоростей с моделью прибора ИСТ-1 при его наклоне на 15° и скорости течения 2 м/с
Fig. 5. The results of modeling the flow of velocities with the model of the IST-1 device with its inclination by 15° and flow velocity of 2 m/s

По результатам моделирования (см. рис. 5) был построен график профиля скорости течения, проходящего между двумя пьезоизлучателями A и B, расположенными на расстоянии L и наклоне прибора ИСТ-1 на 15° и скорости течения 2 м/с, который представлен на рис. 6.

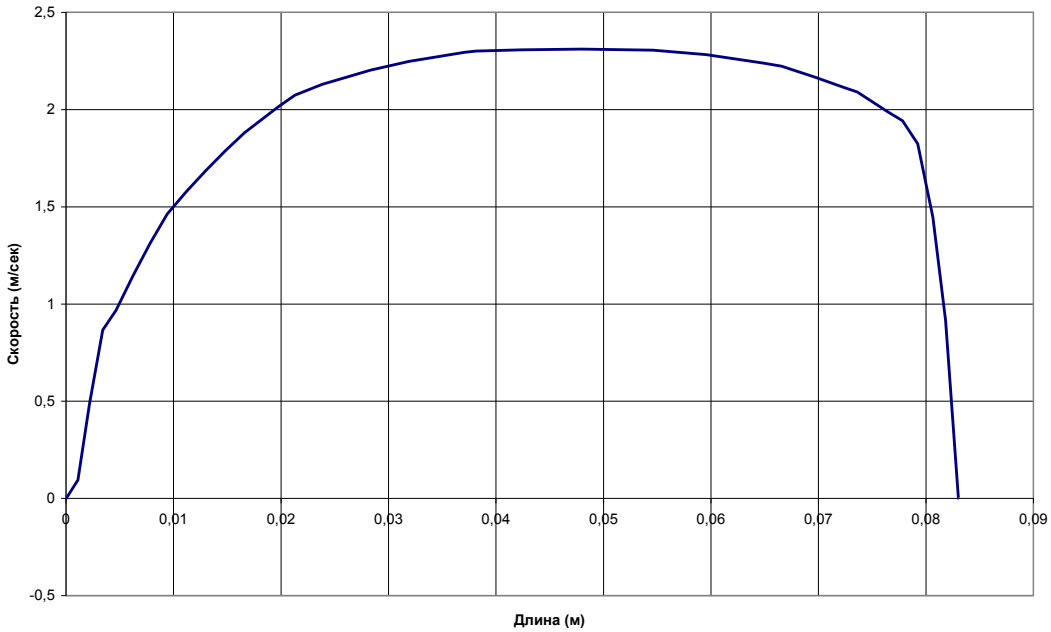


Рис. 6. График профиля скорости течения проходящего между двумя пьезоизлучателями A и B, расположенными на расстоянии L и наклоне прибора ИСТ-1 на 15° и скорости течения 2 м/с
Fig. 6. Graph of the profile of the flow velocity passing between two piezo emitters A and B, located at a distance and inclination of the IST-1 device by 15° and a flow velocity of 2 m/s

Как следует из результатов моделирования величина скорости потока в профиле $V = \frac{1}{L}\int_0^L V(L)dL$, $V(L)$ имеет нелинейный характер и зависит от скорости набегающего потока и его косоструйности. Для данного исследования было построено 50 графиков скорости набегающего потока с дискретностью 1 м/с при скоростях потока до 5 м/с с изменением положения прибора относительно вектора набегающего потока в горизонтальной и вертикальной плоскости с дискретностью 5°.

В результате моделирования было определено, что при косоструйности более 35° начинается резкое падение средней скорости течения между излучателями прибора относительно величины набегающего потока, что приводит к значительным погрешностям измерителя ИСТ-1 по скорости. Аналогично для гидродинамических вертушек резкий спад начинается после 30°. Все полученные данные моделирования дополнительно подтверждены в результате натурных испытаний в гидродинамическом лотке.

Из этих исследований следует, что создать математическую модель для расчета скорости течения с учетом всех влияющих факторов и с приемлемой точностью не представляется возможным. Поэтому величины τ_A и τ_B в уравнении (3) определялись в натурных условиях по результатам градуировки, проведенной на специальном гидродинамическом лотке.

Теперь рассмотрим метод повышения точности измерения скорости звука при прохождении акустических сигналов в измерительном канале прибора с учетом задержек. Структурная схема акустического измерительного канала с задержками представлена на рис. 7.

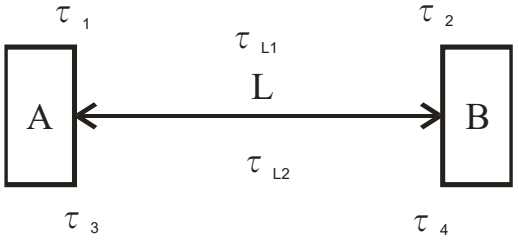


Рис. 7. Структурная схема акустического измерительного канала с задержками
Fig. 7. Structural diagram of an acoustic measuring channel with delays

Здесь *A* и *B* – акустические пьезопреобразователи, расположенные в измерительной трубе на расстоянии *L*.

Каждый из пьезопреобразователей имеет задержку сигнала при передаче τ_1 и τ_3 и при приеме – τ_2 и τ_4. Время прохождения акустического сигнала от преобразователя *A* к преобразователю *B*:

$$\tau_A = \tau_1 + \tau_{L1} + \tau_2, \qquad (4)$$

от преобразователя *B* к преобразователю *A*:

$$\tau_B = \tau_3 + \tau_{L2} + \tau_4, \qquad (5)$$

где $\tau_{L1} = L/(C+V)$ и $\tau_{L2} = L/(C-V)$.

Дополнительно при излучении преобразователем *A* принимаем этим же преобразователем отраженный от преобразователя *B* сигнал

$$\tau_{A0} = \tau_1 + \tau_{L1} + \tau_{L2} + \tau_3. \qquad (6)$$

При излучении преобразователем *B* и приеме им отраженного сигнала

$$\tau_{B0} = \tau_4 + \tau_{L2} + \tau_{L1} + \tau_2. \qquad (7)$$

Сумму времен сигналов τ_A и τ_B можно записать как:

$$\tau_A + \tau_B = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \frac{L}{C+V} + \frac{L}{C-V}, \qquad (8)$$

$$C = \frac{L \pm \sqrt{L^2 + \Delta\tau^2 V^2}}{\Delta\tau}, \qquad (9)$$

где $\Delta\tau = \tau_{A0} + \tau_{B0} - \tau_A + \tau_B -$ величина разностного сигнала в измеряемой жидкости.

При воздействии на измерительный канал температуры *T*, уравнение запишем как:

$$C(T) = \frac{L(T) \pm \sqrt{L^2(T) + \Delta\tau^2 V^2}}{\Delta\tau}. \qquad (10)$$

Длина измерительной базы для конкретной температуры *T* определяется из уравнения

$$L(T) = C_\partial(T)\Delta\tau_\partial,$$

где $\Delta\tau_д(\mathrm{T}) = \tau_{\mathrm{A0}} + \tau_{\mathrm{B0}} - \tau_{\mathrm{A}} - \tau_{\mathrm{B}}$, $C_\partial(T)$ – зависимость скорости звука от температуры в дистиллированной воде. Для расчетов используют известное уравнение пятого порядка [14] зависимости скорости звука от температуры со стандартным отклонением 0,0028 м/с для 148 наблюдений между 0,001 и 95,126°C по шкале Т68. Считается, что точность уравнения составляет 0,015 м/с, а воспроизводимость повторений составляет 0,005 м/с.

$$C_\partial(T) = 1{,}40238744\cdot10^3 + 5{,}03836171\cdot\mathrm{T} - 5{,}81172916\cdot10^{-2}\cdot\mathrm{T}^2 + 3{,}34638117\cdot10^{-4}\cdot\mathrm{T}^3 - 1{,}48259672\cdot10^{-6}\cdot\mathrm{T}^4 + 3{,}16585020\cdot10^{-9}\cdot\mathrm{T}^5.$$

Методически работа заключалась в следующем: прибор серии ИСТ помещался в термостат с дистиллированной водой, где контролировалась температура T образцовым термометром LTA/БЭ 69551-17 дополнительно осуществлялся контроль температуры внутренним измерительным каналом, расположенным в приборе. Одновременно регистрировались временные задержки сигналов при фиксированных значениях температуры, получаемые от микроконтроллера, встроенного в структуру прибора, затем вычислялись значения задержек τ_{A0_i}, τ_{B0_i}, τ_{A_i}, τ_{B_i} как функция $f(T_i)$. По полученным значениям определялась зависимость длины измерительной базы L от температуры T, которая аппроксимировалась полиномом. График приращения длины измерительной базы ΔL от температуры T представлен на рис. 8.

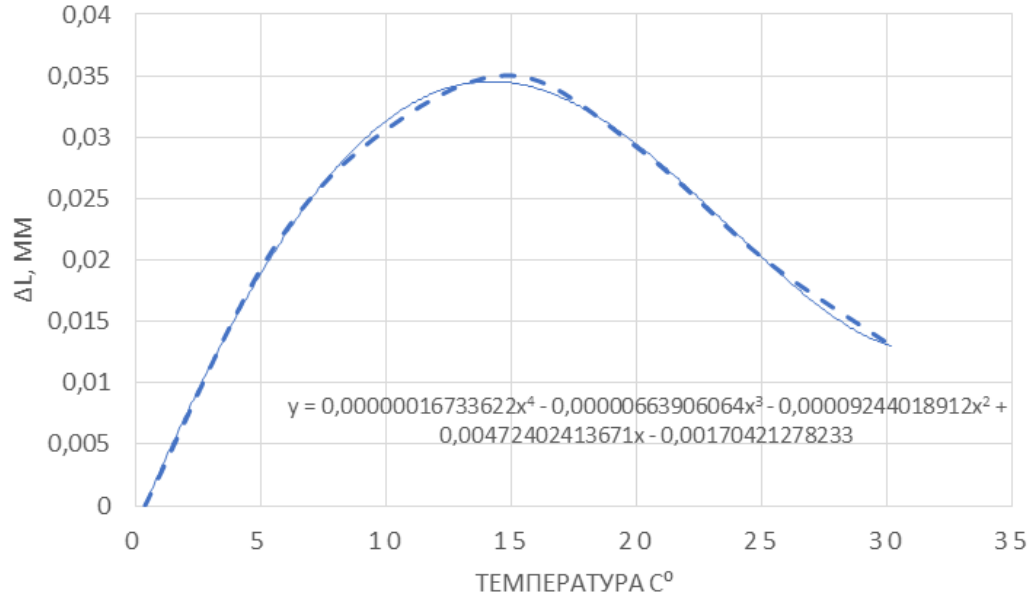


Рис. 8. Зависимость приращения длины измерительной базы ΔL от температуры T
Fig. 8. Dependence of the length increment of the measuring base ΔL on temperature T

Для автоматизации процесса измерения приведенная кривая (рис. 8) аппроксимировалась полиномом

$$y = 0{,}00000016733622x^4 - 0{,}00000663906064x^3 - 0{,}00009244018912x^2 + \\ + 0{,}00472402413671x - 0{,}00170421278233.$$

Оценим влияние скорости течения V на погрешность измерения скорости звука C, при условии, что все временные задержки сигналов в передающих и приемных трактах, включая задержки в акустических преобразователях, и изменение длины измерительной базы учтены по представленной выше методике. Для расчета используем уравнение (9). В результате расчета получен график зависимости приращения скорости звука ΔC от скорости течения V, который представлен на рис. 9.

Из графика (рис. 9) видно, что теоретически максимальная ошибка по скорости звука не превышает 1,6 мм/с для данной конструкции прибора в океанографическом диапазоне изменения скорости звука и в диапазоне скоростей 0–5 м/с.

Таким образом, предложенный метод позволяет обеспечить повышенную точность измерения скорости звука при одновременном измерении скорости течения и температуры для жидких сред с различной плотностью.

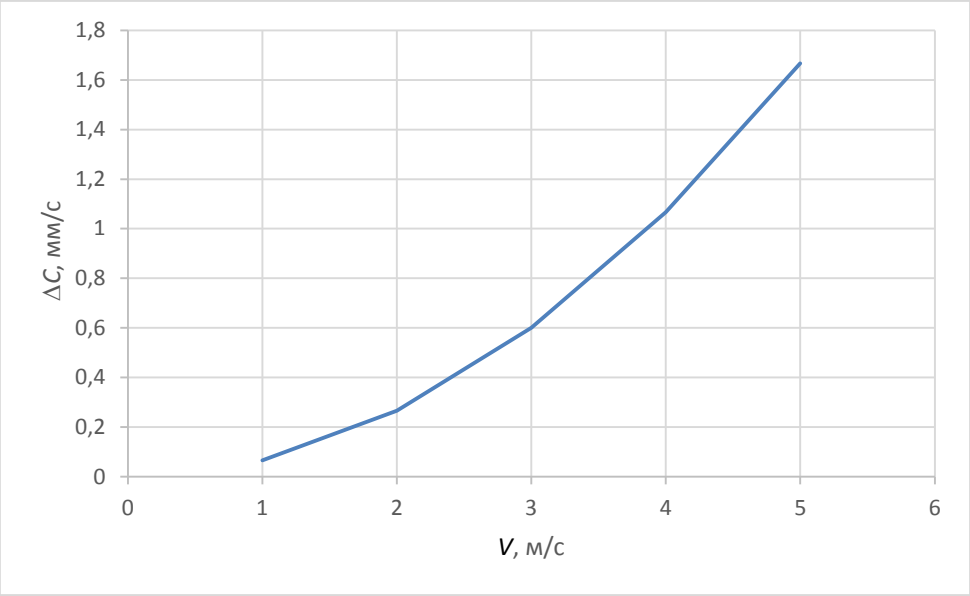


Рис. 9. График зависимости приращения скорости звука от скорости течения
Fig. 9. Graph of the increase in the speed of sound from the speed of the current

Выводы. Разработан метод измерения, в котором используется время прохождения повторных отраженных от преобразователей акустических сигналов, что позволяет учитывать временные аппаратные задержки и изменение длины измерительной базы, влияющие на определение скорости звука и течения, при этом повышается точность измерения параметров скорости звука при одновременном измерении скорости течения и температуры для жидких сред с различной плотностью.

Проведено моделирование профилей скорости течения в измерительной трубе прибора с конфузором в зависимости от кососструйности и скорости набегающего потока, с дискретностью 1 м/с и максимальной скоростью 5 м/с.

Выполнен анализ профилей скорости течения, полученных между двумя пьезоизлучателями, расположенными на расстоянии L, из чего следует, что создать математическую модель для расчета скорости течения с учетом всех влияющих факторов и с приемлемой точностью не представляется возможным. Поэтому величины задержек необходимо определять в натурных условиях, используя результаты градуировки, проведенной на специальном гидродинамическом лотке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Греков Н.А., Гайский П.В., Мишуров В.Ж., Бондаренко А.С.* Переносной измеритель скорости течения ИСТ-1 // Системы контроля окружающей среды. Средства и мониторинг. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. С. 35–40.

2. *Греков Н.А., Греков А.Н., Даниленко М.Я., Жемков Е.И.* Исследование акустического канала измерителя скорости течения // Системы контроля окружающей среды. Средства, модели и мониторинг. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. С. 28–31.

3. *Алексеев С.Ю., Греков А.Н.* Акустический измеритель скорости и направления течения ИСТ-1М речного и морского назначения // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. С. 77–82.

4. *Греков А.Н., Греков Н.А.* Измерители скорости течений для морских и речных условий ИСТ-1 и ИСТ-1М // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 2. С. 77–84.

5. *Mandard E., Kouame D., Battault R., Remenieras J.P., Patat F.* Transit time ultrasonic flowmeter: Velocity profile estimation // Ultrasonics. 2005. Vol. 2. P. 763–766.

6. *Willatzen M., Kamath H.* Nonlinearities in ultrasonic flow measurement // Flow Meas. Instrum. 2008. Vol. 19. P. 79–84.

7. *Rajita G., Mandal N.* Review on transit time ultrasonic flowmeter // In Proceedings of the International Conference on Control, Kolkata, India, 28–30 January 2016.

8. *Lynnworth L.C., Liu Y.* Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005 // Ultrasonics. 2006. Vol. 44. P. E1371–E1378.

9. *Iooss B., Lhuillier C., Jeanneau H.* Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters: Uncertainties due to flow profile and fluid turbulence // Ultrasonics. 2002. Vol. 40 (9). P. 1009–1015. DOI: 10.1016/s0041-624x(02)00387-6

10. *Hui Zhang, Chuwen Guo, Jie Lin*. Effects of Velocity Profiles on Measuring Accuracy of Transit-Time Ultrasonic Flowmeter // Appl. Sci. 2019. Vol. 9. P. 1648. DOI:10.3390/app9081648

11. *Liu Z.G., Du G.S., Shao Z.F., He Q.R., Zhou C.L.* Measurement of transitional flow in pipes using ultrasonic flowmeters // Fluid Dyn. Res. 2014**.** Vol. 46 (5). P. 055501.

12. www.autodesk.ru/autocad

13. www.solidworks.ru

14. *Del Grosso V.A., Mader C.W.* Speed of sound in pure water // The Journal of the Acoustical Society of ca. 1972. Vol. 52. P. 1442. https://doi.org/10.1121/1.1913258

INCREASING THE ACCURACY OF SOUND VELOCITY MEASUREMENT IN A VECTOR SINGLE-BEAM ACOUSTIC CURRENT VELOCITY METER

A.N. Grekov, N.A. Grekov, S.S. Peliushenko

Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28
E-mail: i@angrekov.ru

Acoustic flow velocity and direction meters from the IST series, which can be integrated into various measuring systems, are considered. The simulation of the flow profile in the measuring tube was carried out depending on the free flow velocity. A measurement method has been developed that uses the transit time of repeated acoustic signals reflected from the transducers, which makes it possible to take into account time hardware delays and a change in the length of the measuring base, which affect the determination of the speed of sound and flow, while increasing the accuracy of measuring the sound speed parameters with simultaneous measuring the flow velocity and temperatures for liquid media of different densities.

Keywords: sound speed, flow velocity profile, error, modeling, measurement, acoustic device

REFERENCES

1. *Grekov N.A., Gaisky P.V., Mishurov V.Zh., and Bondarenko A.S.* Perenosnoy izmeritel' skorosti techeniya IST-1 (Portable flow meter IST-1). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy,* 2005, pp. 35–40.

2. *Grekov N.A., Grekov A.N., Danilenko M.Ya., and Zhemkov E.I.* Issledovaniye akusticheskogo kanala izmeritelya skorosti techeniya (Investigation of the Acoustic Channel of the Current Velocity Meter). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2007, pp. 28–31.

3. *Alekseev S.Yu. and Grekov A.N.* Akusticheskiy izmeritel' skorosti i napravleniya techeniya IST-1M rechnogo i morskogo naznacheniya (Acoustic current velocity and direction meter IST-1M for river and sea purposes). *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2008, pp. 77–82.

4. *Grekov A.N. and Grekov N.A.* Izmeriteli skorosti techeniy dlya morskikh i rechnykh usloviy IST-1 i IST-1M (Current velocity meters for sea and river conditions IST-1 and IST-1M). *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal,* 2010, No. 2, pp. 77–84.

5. *Mandard E., Kouame D., Battault R., Remenieras J.P., and Patat F.* Transit time ultrasonic flowmeter: Velocity profile estimation. *Ultrasonics*, 2005, Vol. 2, pp. 763–766.

6. *Willatzen M. and Kamath H.* Nonlinearities in ultrasonic flow measurement. *Flow Meas. Instrum*., 2008, Vol. 19, pp. 79–84.

7. *Rajita G., and Mandal N.* Review on transit time ultrasonic flowmeter. *In Proceedings of the International Conference on Control*, Kolkata, India, 28–30 January 2016.

8. *Lynnworth L.C. and Liu Y.* Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005. *Ultrasonics*, 2006, Vol. 44, pp. E1371–E1378.

9. *Iooss B., Lhuillier C., and Jeanneau H.* Numerical simulation of transit-time ultrasonic flowmeters: Uncertainties due to flow profile and fluid turbulence. *Ultrasonics*, 2002, Vol. 40(9), pp. 1009–1015. DOI: 10.1016/s0041-624x(02)00387-6

10. *Hui Zhang, Chuwen Guo, and Jie Lin*. Effects of Velocity Profiles on Measuring Accuracy of Transit-Time Ultrasonic Flowmeter. *Appl. Sci*. 2019, Vol. 9, pp. 1648. DOI:10.3390/app9081648

11. *Liu Z.G., Du G.S., Shao Z.F., He Q.R., and Zhou C.L.* Measurement of transitional flow in pipes using ultrasonic flowmeters. *Fluid Dyn. Res*., 2014, Vol. 46(5), pp. 055501.

12. www.autodesk.ru/autocad

13. www.solidworks.ru

14. *Del Grosso V.A. and Mader C.W.* Speed of sound in pure water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1972, Vol. 52, pp. 1442. https://doi.org/10.1121/1.1913258

УДК [621.8-045.79:535.241.46]:519.237.5 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-3-117-126

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСВЕЩЁННОСТИ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ФОТОМОДУЛЯЦИОННЫМ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

В.А. Нурзай, Ю.М. Быковский

Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: VANurzai@sevsu.ru

Исследовано влияние освещённости поверхности на погрешность измерения вибрации фотомодуляционным голографическим способом. Применён регрессионный анализ полученных статистических данных, выведено уравнение зависимости минимально различимой амплитуды перемещений от освещённости, посредством дисперсионного анализа найдены оптимальные диапазоны освещённости. Ранняя фиксация отклонений вибрации от нормы позволяет принять меры по предотвращению или уменьшению последствий развития аварии техногенных объектов, что делает актуальным дальнейшее развитие и совершенствование методов промышленной виброметрии [1].
Ключевые слова: измерение вибрации, оптический контроль, регрессионный анализ

Поступила в редакцию: 11.08.2022. После доработки: 30.08.2022.

Введение. Существующие задачи измерения вибрационных параметров в масштабах технологических производств и рабочих пространств охватывают широкий диапазон, как частот, так и амплитуд перемещения поверхностей [2]. Эти задачи решаются применением контактных и бесконтактных методов [3]. В рамках решения научной задачи авторами разрабатывается бесконтактный оптический фотомодуляционный способ измерения параметров вибрации низких и ультранизких частот с миллиметровыми и более амплитудами. Суть способа заключается в размещении на контролируемой поверхности тонкоплёночных голографических тест-объектов, обладающих поверхностным микрорельефом и работающих в отраженном свете, способных к дифракции падающего света в видимом диапазоне. Для освещения объектов используются немерцающие светодиоды. Само же измерение частоты и амплитуды вибрации производится косвенным образом, с использованием видеорегистратора, опираясь на межкадровые изменения в яркости и цветовом диапазоне тест-объектов.

Применение данного способа позволит расширить спектр существующих бесконтактных методов, увеличить количество точек и областей одновременного измерения, параллельно с применяемыми методами, что повысит надёжность эксплуатации оборудования и позволит контролировать наступление аварий на ранних стадиях.

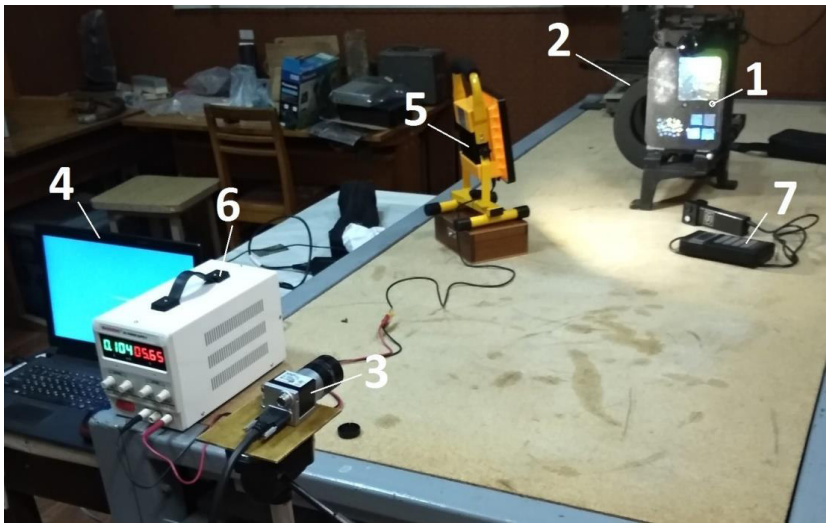
Постановка задачи. Для любого оптического метода измерения, в том числе и лазерного, существенное влияние на погрешность измерения, и даже на саму возможность осуществления измерений, оказывает освещённость контролируемой поверхности. Для лазерных методов зависимость прямая – чем фоновая освещенность ниже, тем лучше. Для безлазерных фотомодуляционных методов, эта зависимость сложнее и носит нелинейный характер. Так, при низкой освещённости поверхности, цифровая камера, используемая в качестве датчика, будет выдавать большие помехи за счёт увеличения коэффициента чувствительности. А при чрезмерной освещённости кадры видеосъёмки станут засвеченными и, касаемо разрабатываемого способа, не будут видны изменения яркости и цветности пикселей, отображающих голографические тест-объекты. Следовательно, в зависимости от применяемой видеокамеры, её оптики, светофильтров, а также амплитуд вибрации, существуют

некие диапазоны, в которых применяемый способ даст наиболее точные показания за счёт уменьшения погрешностей видеотракта. В рамках этой статьи выявлены такие диапазоны при условии применения промышленной видеокамеры с настраиваемыми параметрами съёмки. Определены границы применимости способа в зависимости от уровня освещённости поверхности.

Для исследования влияния освещённости поверхности на погрешность измерения вибрации разрабатываемым фотомодуляционным голографическим способом был применён регрессионный анализ. В его рамках получено нелинейное квадратичное уравнение зависимости минимально различимой амплитуды перемещений от освещённости, подтверждена адекватность модели по критерию Фишера. Посредством дисперсионного анализа найдены оптимальные диапазоны освещённости.

Описание эксперимента. Проведена серия лабораторных экспериментов для определения граничных уровней освещённости поверхности, при использовании разрабатываемого способа контроля параметров вибрации. В рамках эксперимента контролировался отклик оптической системы на изменение пространственного положения поверхности и, соответственно, тест-объекта, размещенного на ней. По результатам можно сделать выводы о полученной предельной точности способа по определению амплитуды вибрации или перемещения и выявить оптимальный диапазон освещённости поверхности.

Проведено исследование влияния освещённости поверхности на величину минимально-определимых перемещений при измерении разрабатываемым оптическим способом (рис. 1).



1 – голографический тест-объект на контролируемой поверхности, 2 – поворотный столик, 3 – видеокамера, 4 – ноутбук, 5 – светодиодный прожектор, 6 – аналоговый блок питания для управления освещением, 7 – люксметр.

Рис. 1. Фото эксперимента

1 – holographic test object on the controlled surface, 2 – turntable, 3 – video camera, 4 – laptop, 5 – LED spotlight, 6 – analog power supply for spotlight, 7 – luxmeter.

Fig. 1. Photo of the experiment

Исследуемая поверхность располагалась на поворотном столике с возможностью задания плоскопараллельного перемещения, соосного с воспринимающей цифровой видеокамерой. Информация с камеры записывалась непосредственно на ноутбук. Сама поверхность перпендикулярна оптической оси и на неё наклеен плоский голографический тест-объект, обладающий эффектом диспер-

сии видимого света. Поверхность освещалась немерцающими светодиодами, запитанными от источника постоянного напряжения. Светодиоды располагались на расстоянии 1 м от освещаемой поверхности. Освещённость поверхности контролировалась люксметром. Условия эксперимента сведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры эксперимента

Коэффициент пульсации освещённости, %	0
Изменение освещённости поверхности, лк	0–1520
Диапазон перемещений контролируемой поверхности, мм	0,4–50
Минимально контролируемое перемещение, мм	0,1
Модель видеокамеры	Basler acA 1440-220uc
Объектив	Basler Lens C125-0418-5M-P f4mm
Диафрагма	F 1.8
Частота кадров видеокамеры, к/с	10
Время экспозиции кадра, мс	80
Длительность одного видеофрагмента, с	5–7
Минимальная и максимальная площади прямоугольных областей контроля на кадре, пискелей	36–861
Модель люксметра	«ТКА-ПКМ»(09)

Всего было проведено 4 серии экспериментов, отличающихся местоположением источника освещения и, соответственно, углом падения света на тест-объект. В рамках каждого эксперимента освещение менялось от минимального к максимальному, регулировкой подаваемого на прожектор напряжения от блока питания, принимая 10 промежуточных значений, которые были объединены впоследствии для расчётов из всех серий – в 10 групп по уровням, по 4 значения в группе.

Для каждого установленного уровня освещения контрольной поверхности был отснят видеофрагмент длительностью 5-7 с для каждого отдельного положения контролируемой поверхности. В течение всего видео поверхность и освещение были статичны. В каждом видео, в зависимости от условий освещения, которые менялись между экспериментами (расположение источника освещения), были выбраны одна или две небольших рабочих области, одинаковые на всём протяжении эксперимента, включающие в себя участки голографического тест-объекта, наиболее подверженные изменению цветности, по мере отдаления поверхности от объектива камеры. В качестве значащих величин были выбраны максимальные и минимальные значения каждой из трех цветовых компонент по сумме пикселей всей области. Эти значения изменялись от кадра к кадру, что вызвано помехами цифровой обработки сигнала. Далее эти значения, выступающие в качестве границ диапазонов в которых флуктуировал каждый отдельный цвет, сравнивались между видеофрагментами, по мере отдаления тестовой поверхности, по технике – каждый с каждым. А так как каждому видео соответствует определенное заданное линейное перемещение поверхности от изначального положения, можно судить о том, на каких расстояниях перемещения диапазоны не перекрывают друг друга. Так как диапазонов три, по количеству цветов (RGB), то было принято решение – считать минимально определяемым перемещением то, при котором не перекрываются минимум два диапазона из трёх. Если контролируемых областей на кадре две, то считалось, что в каждой из них должно быть минимум два неперекрывающихся диапазона.

В результате экспериментов получен набор пар данных: освещённость поверхности и соответствующее ей, минимальное определяемое расстояние перемещения. Для обработки массива данных применён регрессионный анализ, с целью выявления взаимосвязи освещённости и возможной точности применяемого способа.

Регрессионный анализ. Гипотеза – зависимость минимальной фиксируемой амплитуды при измерении колебаний оптическим фотомодуляционным способом зависит от освещённости исследуемой поверхности по параболическому закону:

$$\widetilde{y}_i = ax_i^2 + bx_i + c\,.$$

Получим $\{x_i; y_i\}n$ – набор экспериментальных данных

$$y = f(x)\,,$$

где x_i – освещённость, y_i – мин. амплитуда перемещения, a,b,c – параметры, a – крутизна параболы (определяется качеством оптической системы), b – высота минимальной точки, (определяется разрешающей способностью объектива и расстоянием съёмки). Эта точка отрицательная, но на самом деле график параболы усечён снизу по точкам выше оси OX. c – пересечение графиком оси OY (теоретическая точка при отсутствии освещения, её не существует, но она определяется как аппроксимация графика от точек с минимальной освещённостью).

Чем меньше освещённость перемещающейся поверхности, тем больше должен быть размах перемещения, для его фиксации, что обусловлено снижением чувствительности ПЗС-матрицы при недостаточной освещённости и ростом помех. Тот же эффект ожидается и при избыточно сильном освещении, что приведет к засветке кадра, и, как следствие, к снижению чувствительности.
Получаем модель нелинейную относительно включенных в анализ объясняющих переменных, но линейную по оцениваемым параметрам.

Параметры находятся по Методу наименьших квадратов.

S – сумма квадратов отклонений

$$S = \sum_{i=1}^{n}(y_i - f(x_i))^2 \to \min,$$

$$S_{(a;b;c)} = \sum_{i=1}^{n}(y_i - ax^2 - bx - c)^2 \to \min.$$

Приравняем к нулю частные производные и получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{cases} \dfrac{\partial S}{\partial a} = -2\sum\limits_{i=1}^{n} x_i^2(y_i - ax_i^2 - bx_i - c) = 0 \\ \dfrac{\partial S}{\partial b} = -2\sum\limits_{i=1}^{n} x_i(y_i - ax_i^2 - bx_i - c) = 0 \\ \dfrac{\partial S}{\partial c} = -2\sum\limits_{i=1}^{n} (y_i - ax_i^2 - bx_i - c) = 0 \end{cases}.$$

Раскроем скобки:

$$\begin{cases} -\sum\limits_{i=1}^{n}(x_i^2 y_i) + a\sum\limits_{i=1}^{n} x_i^4 + b\sum\limits_{i=1}^{n} x_i^3 + c\sum\limits_{i=1}^{n} x_i^2 = 0 \\ -\sum\limits_{i=1}^{n}(x_i y_i) + a\sum\limits_{i=1}^{n} x_i^3 + b\sum\limits_{i=1}^{n} x_i^2 + c\sum\limits_{i=1}^{n} x_i = 0 \\ -\sum\limits_{i=1}^{n} y_i + a\sum\limits_{i=1}^{n} x_i^2 + b\sum\limits_{i=1}^{n} x_i + c\cdot n = 0 \end{cases}.$$

После разделения каждого члена на n получим СЛАУ:

$$\begin{cases} a\overline{x^4} + b\overline{x^3} + c\overline{x^2} = \overline{x^2 y} \\ a\overline{x^3} + b\overline{x^2} + c\overline{x} = \overline{xy} \\ a\overline{x^2} + b\overline{x} + c = \overline{y} \end{cases}.$$

Подставим в эту систему экспериментальные данные и сведем значения в табл. 2:

Таблица 2. Средние значения экспериментальных данных

№ п/п	x_i	y_i	x_i^2	x_i^3	x_i^4	$x_i y_i$	$x_i^2 y_i$	$\widetilde{y}_i$	ε_i
1–40	0,1–1520	0,4–50							
Среднее:	**546,085**	**10,8325**	**$5{,}23\cdot10^5$**	**$5{,}94\cdot10^8$**	**$7{,}44\cdot10^{11}$**	**8363,028**	**$1{,}16\cdot10^7$**	**10,76**	**0,071**

Получим уравнение в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \overline{x^4} & \overline{x^3} & \overline{x^2} \\ \overline{x^3} & \overline{x^2} & \overline{x} \\ \overline{x^2} & \overline{x} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{x^2 y} \\ \overline{xy} \\ \overline{y} \end{pmatrix}.$$

Решим его в программе Excel:

если A·X=B, то X=A^{-1}·B,

где A^{-1} – матрица обратная исходной.

Получим: $X = \begin{pmatrix} 5{,}522 \cdot 10^{-5} \\ -0{,}065 \\ 17{,}374 \end{pmatrix}$.

Искомая функция имеет следующий вид:

$$5{,}522 \cdot 10^{-5} x_i^2 - 0{,}065 x_i + 17{,}374 = y_i .$$

Построим график полученной функции и сравним его с экспериментальными точками (рис. 2).

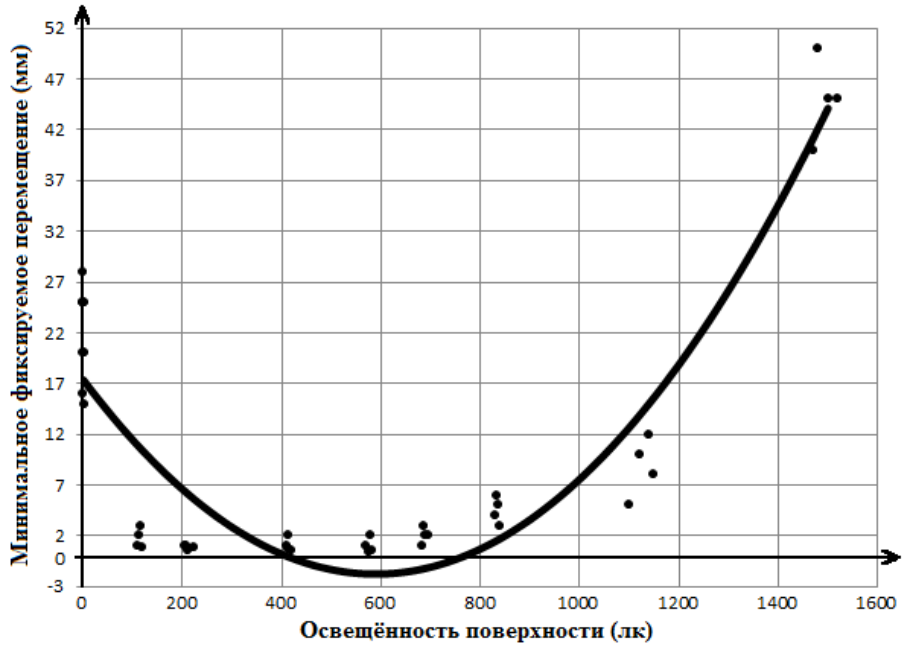


Рис. 2. График уравнения регрессии и экспериментальные точки
Fig. 2. Graph of the regression equation and experimental points

Анализируя полученный график, следует отметить, что часть параболы ниже оси абсцисс не существует, потому что минимально определяемое расстояние может стремиться к нулю, но не может быть отрицательным. Также из-за большого разброса показаний измерений при недостаточной освещённости, центр параболы явно смещён вправо.

Рассчитанные из уравнения теоретические значения $\widetilde{y}_i$ и их отклонения ε_i от экспериментальных данных сведены в табл. 2.

Рассчитаем остаточную дисперсию по формуле:

$$D_{OCT} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \widetilde{y}_i)^2}{n-3},$$

где 3 – количество параметров ***a***, ***b*** и ***c***.

$D_{OCT} = 29{,}111$.

Стандартное отклонение:

$$\sigma_{OCT} = \sqrt{D_{OCT}} = 5{,}395 .$$

Отклонение относительно мало, что свидетельствует о правильности выбранной модели, однако проверим адекватность модели по критерию Фишера.

В статистике разработан критерий, который очень удобен для проверки ги-

потезы об адекватности модели. Он называется *F*-критерием Фишера и определяется следующей формулой:

$$f = \frac{S^2_{АД}}{S^2_{\{y\}}},$$

где $S^2_{АД} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta y_i^2}{f}$ – дисперсия адекватности или остаточная дисперсия, рассчитанная ранее; $S^2_{\{y\}}$ – дисперсия воспроизводимости со своим числом степеней свободы.

Дисперсия воспроизводимости – это среднее из дисперсий ($\sigma^2 y_i$) всех опытов. Дисперсия воспроизводимости характеризует средний разброс результатов повторных измерений во всех опытах относительно своих математических ожиданий.

Если в каждом опыте число повторных измерений одинаково и равно n (4 опыта по 10 измерений), то $S^2_{ВОСПР}$ определяется по формуле:

$$S^2_{ВОСПР} = \frac{\sum_{n=1}^{N} \sigma^2_{yi}}{N} = \frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{n} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{N(n-3)},$$

где N – число опытов, $\bar{y}_i$ – математическое ожидание в j-м опыте.

$$S^2_{ВОСПР} = \frac{7839{,}639}{4(10-3)} = 279{,}99.$$

F-критерий Фишера:

$$f = \frac{29{,}111}{279{,}99} = 0{,}104.$$

Удобство использования критерия Фишера состоит в том, что проверку гипотезы можно свести к сравнению с табличным значением.

Если рассчитанное значение F-критерия не превышает табличного [4], то, с соответствующей доверительной вероятностью, модель можно считать адекватной. При превышении табличного значения эту приятную гипотезу приходится отвергать.

Числом степеней свободы в статистике называется разность между числом опытов и числом коэффициентов (констант), которые уже вычислены по результатам этих опытов независимо друг от друга [5].

В нашем случае число степеней свободы большей дисперсии равно k_1=7, число степеней свободы меньшей дисперсии равно k_2=37.

Из табл. 3 выбираем:

Таблица 3. Значения F-критерия Фишера при уровне значимости P= 0,05

$k_2 \backslash k_1$	**6**	**8**
35	2,37	2,22
40	2,34	2,18

Полученное значение f = 0,104 меньше табличных, следовательно, с вероятностью 95% модель можно считать адекватной.

Дисперсионный анализ. Критерий Стьюдента может быть использован для проверки гипотезы о различии средних только для двух групп [6]. Если необходимо сравнить большее количество групп, совершенно недопустимо сравнивать их попарно. Для корректного решения этой задачи следует воспользоваться дисперсионным анализом.

Надо сказать, что основные параметрические критерии для множественного сравнения независимых групп могут после некоторых модификаций применяться для установления различий и в повторных измерениях, если дисперсионный анализ установил наличие таких различий.

Однако к применению этих критериев надо прибегать в случае, если дисперсионный анализ показал наличие значимых различий между средними значениями выборок.

Суть применения дисперсионного анализа. Освещённость объекта измерения может изменяться как скачкообразно, при включении или отключении дополнительных источников освещения, так и плавно, в течение дня, от естественного освещения, с положением

солнца, атмосферными явлениями и прочим.

Данные по минимально фиксируемому расстоянию перемещения тестовой поверхности разделяются на 10 групп, согласно освещенности. В каждой группе по 4 значения с освещенностью одного порядка, из 4-х экспериментов соответственно.

Различие показаний между группами обусловлено изменением освещенности и отражает, насколько сильно влияет освещённость поверхности на возможность измерения и получения достоверных результатов.

Различие показаний внутри группы обусловлено погрешностями способа, различными для всех четырех опытов расстояниями и углами освещения.

Эмпирическое корреляционное соотношение показывает, насколько превалирует влияние на возможность измерения, именно освещённости поверхности по сравнению со всеми остальными факторами. Если сравнивать все возможные для применения диапазоны освещённости, то чем выше эмпирическое корреляционное соотношение, тем хуже, тем большее влияние оказывает применяемая освещённость на погрешность измерения, и тем выше должны быть значения фиксируемых перемещений измеряемого объекта. Но если это соотношение низкое, то на всём диапазоне изменения освещённости мы будем фиксировать перемещения с известной предельной точностью.

В конечном итоге дисперсионный анализ должен показать, что в выбранном допустимом диапазоне освещённостей поверхности, включающем некоторые из исследуемых поддиапазонов (их изначально 10), влияние освещённости ниже, чем погрешность способа, обусловленная всеми остальными факторами. То есть внутригрупповая дисперсия должна быть большой, по сравнению с межгрупповой. Заполним комбинационную табл. 4.

Таблица 4. Комбинационная

№ п/п	Диапазоны освещённостей, лк	*y*1	*y*2	*y*3	*y*4	$\bar{y}_i$	$\overline{y_i^2}$	D_i	σ_i	$(y_O - y_i)^2$
1	0,1	25	20	28	25	24,5	608,5	8,25	2,872	186,80
2	1–4	16	15	20	25	19	376,5	15,5	3,937	66,71
3	110–120	1	2	3	0,8	1,7	3,66	0,77	0,877	83,40
4	205–222	1	1	0,5	0,8	0,825	0,7225	0,0419	0,205	100,15
5	410–420	1	2	0,7	0,5	1,05	1,435	0,3325	0,577	95,70
6	570–581	1	0,4	2	0,6	1	1,38	0,38	0,616	96,68
7	682–694	1	3	2	2	2	4,5	0,5	0,707	78,01
8	830–840	4	6	5	3	4,5	21,5	1,25	1,118	40,10
9	1100–1150	5	10	12	8	8,75	83,25	6,6875	2,586	4,34
10	1470–1520	40	50	45	45	45	2037,5	12,5	3,536	1167,42
	Общие средние					**10,83**	313,89	**4,62**		

В рамках дисперсионного анализа, на основе экспериментальных данных, рассчитаем:

$\bar{y}_i$ – среднегрупповые значения,

$n_i = 4$ – количество объектов в группе,

D_i – групповую дисперсию,

$\bar{y}_O$ – общее среднее:

$$\bar{y}_O = \frac{\sum n_i y_i}{\sum n_i} = 10{,}83,$$

$D_{ВГС}$ – внутригрупповую среднюю дисперсию:

$$D_{ВГС} = \frac{\sum n_i D_i}{\sum n_i} = 4{,}62,$$

$D_{МГ}$ – межгрупповую дисперсию:

$$D_{МГ} = \frac{\sum (\bar{y}_i - \bar{y}_O)}{\sum n_i} = 191{,}93,$$

D_O – общую дисперсию:

$$D_O = D_{ВГС} + D_{МГ} = \overline{y_i^2} - \bar{y}_i^2 = 196{,}55.$$

Эмпирическое корреляционное соотношение:

$$\eta = \sqrt{\frac{D_{MГ}}{D_O}} = 0{,}988.$$

Когда в расчёт берётся весь проверенный диапазон освещённости: от 0,1 до 1520 лк, то выявляется практически функциональная зависимость. Различия между группами столь значимы, что погрешности внутри группы не играют никакой роли. Корреляция «Весьма высокая» по шкале Чеддока [7]. Это подтверждает тот факт, что крайне низкие и высокие степени освещённости непригодны для измерения вибрации выбранным фотомодуляционным способом.

Если не брать крайние поддиапазоны в расчёт дисперсий, то эмпирическое корреляционное соотношение будет меньше. Предложено исключить из расчётов те диапазоны освещённости, в которых минимально-различимое расстояние перемещения велико. Таким образом, при аналогичном дисперсионном анализе освещённости поверхности в пределах 110–581 лк получим:

$$D_{ВГС} = 0{,}38,\ D_{MГ} = 0{,}11,$$
$$D_{\text{O}} = 0{,}49,\ \eta = 0{,}473.$$

В данном случае имеем «Умеренную» корреляцию по Чеддоку, а это значит, что изменение освещённости внутри диапазона умеренно влияет на результат измерений. Данный диапазон 110–581 лк определён как наиболее подходящий для осуществления процесса измерения вибрации и перемещений предлагаемым фотомодуляционным способом.

При его расширении вверх 110–694 лк, эмпирическое корреляционное соотношение будет равно $\eta = 0{,}58$, что соответствует «Заметной» корреляции по Чеддоку. Следовательно, при острой необходимости, обусловленной спецификой технологического процесса, или в случае больших диапазонов фиксируемых перемещений, допускается увеличение освещённости в указанных границах.

Согласно [8] требований к освещению помещений промышленных предприятий, освещённость варьируется в диапазоне 20–5000 лк, в зависимости от зрительной работы.

В рамках эксперимента для повышения точности снимались видеофрагменты по 50 кадров – при неподвижном объекте. Выбранная методика фиксации изменения положения контрольной поверхности подходит только для исследований, или в случаях, когда необходима лишь фиксация геометрических смещений медленно движущейся поверхности, однако, при фиксации вибрации, частоту колебаний выгодней рассчитывать по БПФ [9]. В проведённых экспериментах частота съёмки была равна 12,5 к/с. Следовательно, по теореме Котельникова [10] с помощью БПФ можно определять вибрации на ультранизких частотах – до 6 Гц, или с применением строб-эффекта, с разницей частот вибрации и освещения до 6 Гц. Если требуется получить частоту съёмки в 3 и более раз превышающую разность частот поверхности и освещения при строб-эффекте, то экспозиция будет 0,01 с, что в 8 раз меньше, чем в эксперименте. Следовательно, освещение должно быть усилено согласно следующей зависимости (рис. 3).

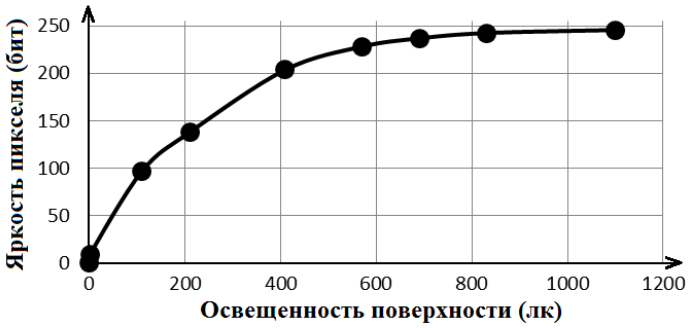


Рис. 3. Экспериментальная зависимость средней яркости пикселя от освещенности поверхности
Fig.3. Experimental dependence of average pixel brightness on surface illumination

Яркость каждого пикселя в цифровом формате изменяется в интервале 0–255, из графика видно, что чем выше освещённость, тем меньше приращение яркости. В каждом конкретном случае организации измерений освещённость должна подбираться индивидуально, в зависимости от светосилы объектива, размера ПЗС-матрицы и физических размеров пикселя, расположения источников освещения и других параметров.

Заключение. Организация освещения на производстве осуществляется в соответствии с принципами безопасности и удобства работы. Разрабатываемый способ измерения вибраций технологических объектов применим в широком диапазоне освещённостей, допустимых в производственных помещениях с постоянным наличием персонала, что делает его более универсальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Салихов А.А.* О механизме возникновения и развития аварии на Саяно-Шушенской ГЭС // Надёжность и безопасность энергетики. 2010. № 3(10) С. 13–16.

2. *Балицкий Ф.Я., Барков А.В., Баркова Н.А.* Неразрушающий контроль: Справочник Т. 7: в 2 кн. Кн. 2: Вибродиагностика, М.: Машиностроение, 2005. 829 с.

3. *ГОСТ* 30296-95 Аппаратура общего назначения для определения основных параметров вибрационных процессов. Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, 1998. 20 с.

4. *Гуськов О.И., Каждан А.Б., Шиманский А.А.* Математическое моделирование в геологии и разведке полезных ископаемых. М.: Недра, 1979. 168 с.

5. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.

6. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика: для инж. и науч. работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

7. *Удинцова Н.М., Коптева Н.А.* Эконометрика: Практикум. Зеленоград: АЧИИ, 2017. 93 с. URL: http://xn--80aqa2d.xn--p1ai/files/2018-10-24-3802c58d-184c-4322-a2f7-d0aac8eb0e76.pdf / (дата обращения: 24.06.2022).

8. *СП* 52.13330.2016. Свод правил. Естественное и искусственное освещение. М.: Стандартинформ, 2018.

9. *Быковский Ю.М., Нурзай В.А.* Обработка видеосигнала для измерения параметров вибрации объектов, расположенных на разных расстояниях от наблюдателя // Сборник научных статей НУК им. Макарова, 2015. № 1. С. 58–62.

10. *Биккенин Р.Р., Чесноков М.Н.* Теория электрической связи. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 329 с.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ILLUMINATION ON THE ERROR OF VIBRATION MEASURING OF TECHNOLOGICAL OBJECTS BY THE PHOTOMODULATION HOLOGRAPHIC METHOD

V.A. Nurzai, Yu.M. Bykovsky

Sevastopol State University,
RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The effect of surface illumination on the measurement error of vibration by the photomodulation holographic method is investigated. A regression analysis of the obtained statistical data is applied, an equation for the dependence of the minimum discernible displacement amplitude on illumination is obtained, and optimal illumination ranges are found by means of dispersion analysis. Early detection of vibration deviations from the norm allows taking measures to prevent or reduce the consequences of the accident progression. This makes further development and improvement of industrial vibrometry methods relevant [1].

Keywords: vibration measurement, optical control, regression analysis

REFERENCES

1. *Salihov A.A.* O mehanizme vozniknovenija i razvitija avarii na Sajano-Shushenskoj GJeS (About the mechanism of occurrence and development of the accident at the Sayano-Shushenskaya HPP). *Nadezhnost' i bezopasnost' jenergetiki*, 2010, No. 3(10), pp. 13–16.

2. *Balitskiy F.Ya., Barkov A.V., and Barkova N.A.* Nerazrushayushchiy kontrol' (Non-Destructive Testing), Moscow: Mashinostroenie, 2005, 829 p.

3. *GOST 30296-95*, Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1998.

4. *Gus'kov O.I., Kazhdan A.B., and Shimanskij A.A.* Matematicheskoe modelirovanie v geologii i razvedke poleznyh iskopaemyh (Mathematical modeling in geology and mineral exploration), Moscow: Nedra, 1979, 168 p.

5. *Adler Ju.P., Markova E.V., and Granovskij Ju.V.* Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij (Planning an experiment in the search for optimal conditions), Moscow: Nauka, 1976, 280 p.

6. *Kobzar' A.I.* Prikladnaja matematicheskaja statistika (Applied mathematical statistics), Moscow: Fizmatlit, 2006, 816 p.

7. http://xn--80aqa2d.xn--p1ai/files/2018-10-24-3802c58d-184c-4322-a2f7-d0aac8eb0e76.pdf (June 24, 2022)

8. *SP 52.13330.2016*. (Set of rules), Moscow: Standartinform, 2018.

9. *Bykovskij Ju.M. and Nurzaj V.A.* Obrabotka videosignala dlja izmerenija parametrov vibracii ob#ektov, raspolozhennyh na raznyh rasstojanijah ot nabljudatelja (Video signal processing for measuring vibration parameters of objects located at different distances from the observer). *Sbornik nauchnyh statej NUK*, 2015, No. 1, pp. 58–62.

10. *Bikkenin R.R. and Chesnokov M.N.* Teorija jelektricheskoj svjazi (Theory of electrical communication). Moscow: Akademija, 2010, 329 p.

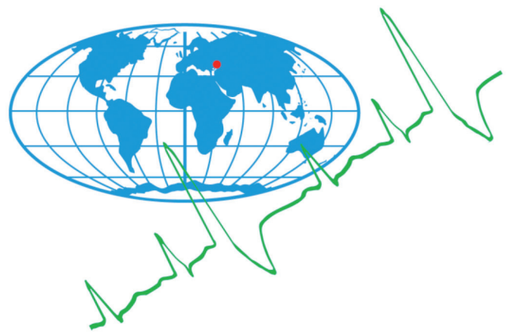
ISSN 2220-5861

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ИНСТИТУТ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 3 (49)



Севастополь

2022

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ № 3 (49) 2022

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Агаркова-Лях И.В. 18

Баранова А.А. 79

Брюховецкий А.А. 84

Быковский Ю.М. 117

Валле А.А. 5

Греков А.Н. 106

Греков Н.А. 106

Егоркин А.А. 44

Дологлонян А.В. 62

Жильникова Н.А. 79

Казанкова И.И. 27

Клименко А.Г. 62

Лелеков С.Г. 97

Лях А.М. 18, 97

Матвеенко В.Т. 62

Ничкова Л.А. 51

Нурзай В.А. 117

Пелюшенко С.С. 106

Пеньков М.Н. 37

Сигора Г.А. 51

Скатков А.В. 84

Смирнова В.О. 79

Сорокин А.Н. 69

Степанова О.А. 37

Федотов А.Б. 12

Хоменко Т.Ю. 51

Шишкин И.А. 79

Шоларь С.А. 37

Щодро А.Е. 69

Системы контроля окружающей среды
Выпуск 3 (49)

Monitoring systems of environment
Issue 3 (49)

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

Технический редактор: И.Г. Шмырева

Подписано к печати 23.09.2022
Выход в свет 29.09.2022
Заказ 51. 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