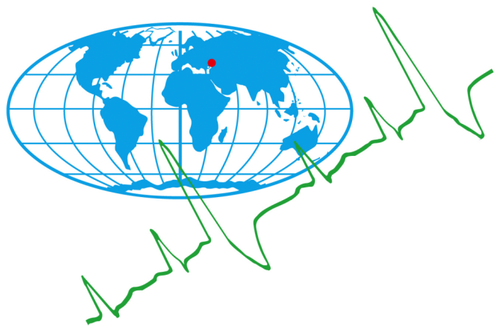
ISSN 2220-5861

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ИНСТИТУТ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 4 (50)



Севастополь

2022

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ № 4 (50) 2022

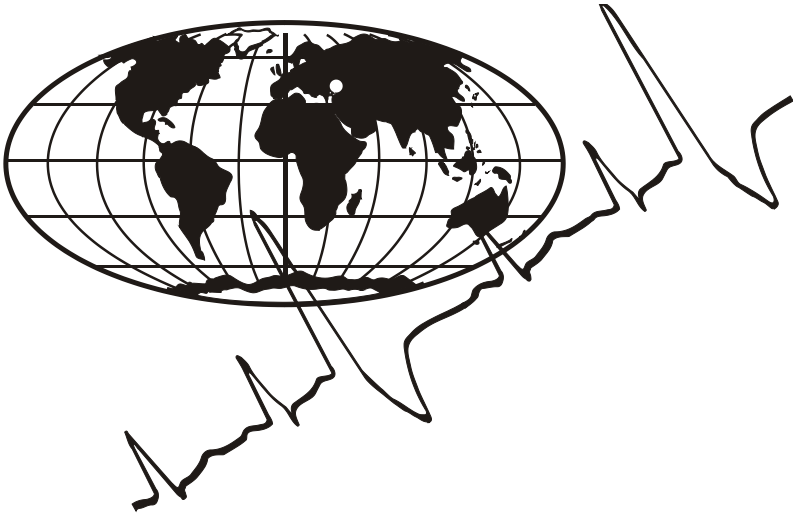
ISSN 2220-5861

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ИНСТИТУТ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 4 (50)



Севастополь

2022

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Выпуск 4 (50) 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), 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 – 0,299. Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,374.

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

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Гайский Виталий Александрович (*к 85-летию со дня рождения*). 5

Научные основы методов и средств контроля и диагностики природной среды и климата

А.Б. Полонский, А.В. Торбинский, А.В. Губарев. Отклик в полях приземной температуры воздуха Европейского региона на Индоокеанский диполь 6

П.А. Сухонос. Анализ асимметрии характеристик верхнего слоя Северной Атлантики по данным ре-анализа ORA-S3 15

А.Б. Федотов. Диагностика процесса разрушения струйного зонального течения как элемента океанической циркуляции при различной локализации ветрового воздействия. 25

И.И. Казанкова, С.В. Казанцев. Результаты контроля движения створок черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. в условиях пищевой недостаточности 31

Технические средства систем контроля природной среды

В.А. Гайский. Метод определения глубины погружения прибора в море при зондировании. 40

В.В. Антонович, О.Ю. Антохина, П.Н. Антохин, В.Г. Аршинова, М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, С.Б. Белан, Д.К. Давыдов, Г.А. Ивлев, А.В. Козлов, Ш.Ш. Максютов, Т. Мачида, Д.А. Пестунов, И.В. Пташник, Т.М. Рассказчикова, Д.Е. Савкин, Сасакава, Д.В. Симоненков, Т.К. Скляднева, Г.Н. Толмачев, А.В. Фофонов. Карбоновые полигоны ИОА СО РАН для исследования динамики парниковых газов в атмосфере. Часть I 46

В.В. Антонович, О.Ю. Антохина, П.Н. Антохин, В.Г. Аршинова, М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, С.Б. Белан, Д.К. Давыдов, Г.А. Ивлев, А.В. Козлов, Ш.Ш. Максютов, Т. Мачида, Д.А. Пестунов, И.В. Пташник, Т.М. Рассказчикова, Д.Е. Савкин, Сасакава, Д.В. Симоненков, Т.К. Скляднева, Г.Н. Толмачев, А.В. Фофонов. Карбоновые полигоны ИОА СО РАН для исследования динамики парниковых газов в атмосфере. Часть II 61

П.В. Гайский, С.А. Шоларь, О.А. Степанова. Лабораторная установка для изучения влияния ультрафиолетовой нагрузки на морскую микробиоту 70

Системы экологического мониторинга

О.С. Алатарцева, Л.В. Стельмах, Р.Р. Сагадатова. Использование ростовых и флюоресцентных показателей для оценки токсического воздействия ионов меди на морские микроводоросли 78

Л.Р. Асфандиярова, Г.В. Хакимова, В.М. Ильин. Контроль и интенсификация процесса очистки сточных вод с использованием высокомолекулярных веществ 87

А.С. Гулин, Р.П. Тренкеншу, А.О. Дыкман. Устройство для культивирования различных размерных групп микроводорослей в естественных условиях и индикации экологической ситуации в водоемах 93

В.Т. Матвеенко, А.В. Дологлонян, А.Г. Клименко. Энергетические и экологические характеристики энергоустановок распределенной энергетики на базе газотурбинных двигателей. 98

Е.И. Азаренко, Л.И. Осадчая. Приоритетные загрязнители и нормативы качества воды притоков реки Черной 104

Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение в системах контроля природной среды

А.Н. Греков, Ю.Е. Шишкин, С.С. Пелюшенко, А.С. Маврин. Применение модели YOLOV5 для обнаружения микрообъектов в морской среде. . 112

Д.А. Антоненков, А.Е. Щодро. Гидродинамическая модель для контроля структуры вторичных течений и их визуализация на участках резко неравномерного движения потока в устьях рек 123

Аппаратная, информационная и метрологическая надежность систем контроля природной среды

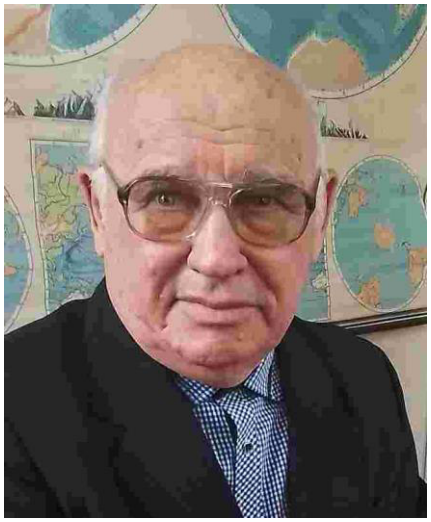
Д.В. Моисеев, А.В. Скатков, А.А. Брюховецкий. Математические модели и методы многоуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена БТС для систем контроля окружающей среды . . . 133

Краткие сообщения

А.С. Лубков. Научный прогноз: Начнется ли Эль-Ниньо в 2023 году? 143

Алфавитный указатель авторов. 145

Виталий Александрович Гайский
(к 85-летию со дня рождения)



31 октября 2022 года исполнилось 85 лет Гайскому Виталию Александровичу, заместителю главного редактора журнала «Системы контроля окружающей среды», доктору технических наук, профессору, главному научному сотруднику и заведующему лабораторией Института природно-технических систем, известному ученому в области морского научного и экологического приборостроения и измерительных информационных технологий.

Виталий Александрович внес существенный вклад в создание 9-ти поколений отечественных океанографических приборов и автоматизированных систем, внедренных на научно-исследовательских судах.

Им опубликовано более 330 научных работ, в том числе 7 фундаментальных монографий. Он автор 75 изобретений. Виталий Александрович продолжает активно работать. За последние 5 лет он опубликовал более 30 работ, включая 3 монографии и 7 патентов. В них обобщены результаты разработки перспективных методов и средств температурных измерений в море точечными и распределенными модулированными датчиками с коррекцией динамических погрешностей, основанных на оригинальных алгоритмах, описаны современные подходы к измерениям профилей гидрофизических характеристик с их разложением по ортогональным функциям, предложены методы и устройства прямого измерения локальной плотности морской воды в глубоководных приборах. В развитие морских измерительных информационных технологий В.А. Гайским предложены: вариант многомерного гармонического анализа с разделением переменных, широкоформатный спектральный анализ с расширением спектра процедурой антиэлиайзанга, пакетная дискретизация сигналов, аналитическая взаимосвязь надежности и точности систем мониторинга окружающей среды.

Изобретение измерителя температуры с тремя разными инерционными датчиками и динамической коррекцией получило золотую медаль XIV Международного салона изобретений и новых технологий «Новое время», проходившего 27–29 сентября 2018 г.

Профессор В.А. Гайский принимает активное участие в производственной жизни института, руководит научным направлением и лабораторией, участвует в работе Ученого и Диссертационного Советов, в организации и проведении ежегодной Международной научно-практической конференции «Системы контроля окружающей среды».

Редакционная коллегия искренне желает Виталию Александровичу Гайскому здоровья, долголетия, успехов в научной деятельности и счастья в личной жизни.

Редакционная коллегия

УДК 551.513.7 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-6-14

ОТКЛИК В ПОЛЯХ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ЕВРОПЕЙСКОГО РЕГИОНА НА ИНДООКЕАНСКИЙ ДИПОЛЬ

А.Б. Полонский, А.В. Торбинский, А.В. Губарев

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

Целью настоящей работы является исследование влияния независимых от Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК) событий Индоокеанского диполя (ИД) на пространственно-временную изменчивость приземной температуры воздуха (ПТВ) Европейского региона. Привлекались данные атмосферного ре-анализа ERA5 о среднемесячных значениях ПТВ, а также индексы ИД и ЭНЮК за период 1959 – 2020 гг. Установлено, что при развитии положительной фазы интенсивных событий ИД обширные положительные аномалии температуры над Европой достигают +(3–4)ºС. В отрицательную фазу ИД, наоборот, над большей частью Европейского региона наблюдается рост абсолютной величины отрицательных аномалий ПТВ (до –(4–5)ºС).

Ключевые слова: Индоокеанский диполь, Эль-Ниньо – Южное колебание, аномалии приземной температуры воздуха, Европейский регион.

Поступила в редакцию: 21.11.2022. После доработки: 05.12.2022.

Введение. Индоокеанский диполь (ИД) – один из основных естественных источников климатической изменчивости в системе «океан-атмосфера» межгодового масштаба. Это явление представляет собой одну из основных мод, характеризующих межгодовую изменчивость крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы в экваториально-тропической зоне Мирового океана [1]. События ИД проявляются в виде противофазных межгодовых колебаний характеристик взаимодействия океана и атмосферы в западной и восточной частях экваториально-тропической зоны Индийского океана [2]. Изменчивость в системе «океан-атмосфера», связанная с событиями ИД, оказывает существенное влияние на климат в прилегающих к Индийскому океану районах. Оно обычно проявляется в виде аномального переноса влаги и выражается в виде обильных осадков или, наоборот, аномальных засух [3–6].

Что касается влияния ИД на климат Европы, то оно мало изучено, но в последнее время обращает на себя все более пристальное внимание со стороны научного сообщества. Рост интереса к исследованию этого вопроса, в первую очередь, вызван аномальным изменением метеорологических параметров над Европой в начале 2000-х гг. Пример аномальных событии такого типа был, в частности, представлен в работах [7–9], в которых описывается необычно жаркое и сухое лето 2003 г., когда средняя аномалия температуры в регионе достигла 3–5°С в сравнении с нормой за 1961–1990 гг. Это явление получило название «heat wave» (тепловая волна). Во время первой такой «тепловой волны» в мае 2003 г. в Центральной и Южной Европе среднемесячная температура поднялась до 30°С [10], что, согласно оценкам авторов работы [11], произошло первый раз за последние 500 лет. Летом 2006 г. во время второй «тепловой волны» новые температурные рекорды были зарегистрированы по всей территории Европы [12]. Например, во Франции, в Париже и Ницце впервые за весь период наблюдений для июля была зафиксирована температура 37°С, а в Нидерландах август охарактеризовался аномальным (до 200мм) количеством осадков. Следом, за «тепловыми волнами» 2003 г. и 2006 г. последовали аналогичные собы-

тия в 2015, 2017 и 2019 гг., которые имели катастрофические социально-экономические последствия [13].

Известно, что в зимний период аномальность гидрометеорологических условий над Европейским регионом в значительной степени обусловлена Североатлантическим колебанием (САК) [14] и Эль-Ниньо Южным колебанием (ЭНЮК) [15]. Но это влияние не объясняет аномалии температуры и других гидрометеорологических параметров в летние месяцы. Можно предположить, что летом изменчивость полей температуры над Европой объясняется событиями других осцилляций, включая ИД. В связи с удаленностью Индоокеанского региона, одним из наиболее вероятных механизмов влияния ИД может быть воздействие экваториального океана на внетропические атмосферные процессы посредством распространения возмущений (в виде волн Россби или аномальной вихревой активности) из зоны повышенной конвекции, возникающей во время положительной фазы ИД над Северной Африкой. Вследствие этого, можно ожидать, что ИД аналогично другим глобальным модам может не только влиять на климатическую изменчивость экваториально-тропической зоны, но и частично определять изменчивость климатических характеристик Европейского и Средиземноморско-Черноморского регионов.

Ранее в работе [16] была произведена оценка влияния ИД на пространственно-временную изменчивость приземной температуры воздуха (ПТВ) и поля атмосферного давления (ПД) Средиземноморско-Черноморского региона. Обнаружено, что наибольшие (по абсолютной величине) значения коэффициентов корреляции между индексом ИД, ПТВ и ПД достигают –0,30 (для ПТВ) и –0,49 (для ПД) и приходятся на период максимального развития ИД летом Северного полушария. Позднее на основании анализа серии специализированных численных экспериментов в работе [17] было обнаружено следующее: при отрицательной фазе ИД в летний период формируется обширная область повышенных осадков в Центральной и Восточной Европе - к западу и северо-западу от Черного моря, с максимальными значениями аномалий над площадью водосбора р. Дунай. Позже этот результат был подтвержден с помощью данных наблюдений над изменчивостью расходов этой реки [18].

В данной работе будет произведена оценка влияния независимых от ЭНЮК событий ИД на межгодовую изменчивость ПТВ в Европейском регионе, в том числе в годы, в которые регистрировались «тепловые волны». Это позволит подтвердить наличие значимого влияния ИД на аномалии ПТВ в Западной, Центральной и Восточной Европе.

Характеристика использованного материала. Методика обработки. В работе использованы результаты глобального атмосферного ре-анализа ERA5 (European Centre for Medium Range Weather Forecasts Re-Analysis), за период 1959–2020 гг. по ПТВ с месячным разрешением в узлах регулярной сетки 0,25° на 0,25°.

Исследовалась область, ограниченная координатами 30°–72° с.ш. и 10° з.д. – 42° в.д., которую в дальнейшем мы будем называть Европейским регионом (рис. 1). Полученные временные ряды ПТВ сравнивались с климатическим индексом DMI (Dipole Mode index), который обычно используется в качестве количественной характеристики ИД. Этот индекс представляет собой нормированную разность аномалий температуры поверхности океана между западной (50°–70° в.д., 10° ю.ш.–10° с.ш.) и восточной (90°–110° в.д., 0°–10° ю.ш.) частями экваториальной зоны Индийского океана [19]. В первую очередь, были выделены годы наиболее «сильных» событий ИД. Последние выделялись по следующему критерию: в году должно быть не менее трех месяцев с значением DMI не менее 0,4 по модулю.

Далее, по тому же принципу, с помощью индекса Niño 3.4 были выделены

все «сильные» события ЭНЮК, с той разницей, что величина индекса для такого события не должна быть ниже 1 по абсолютному значению. Индекс Niño 3.4 определялся на основе аномалий температуры поверхности океана (ТПО) относительно среднемноголетней ТПО в регионе, расположенном на экваторе в центральной (5° с. ш. –5° ю. ш., 120–170° з. д.) части Тихого океана [20].

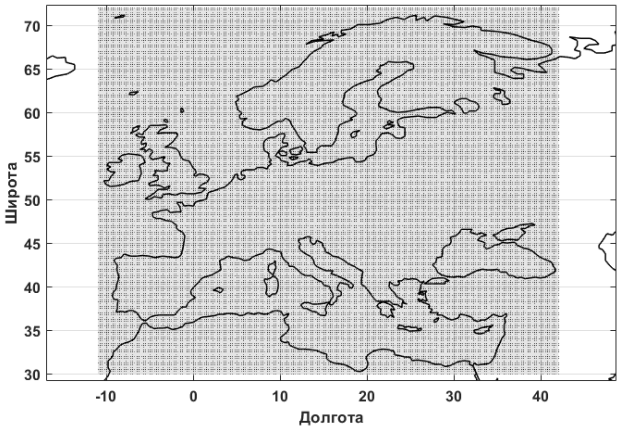


Рис. 1. Область с координатами 30°–72° с.ш. и 10° з.д. – 42° в.д.,
для которой проводился анализ данных ре-анализа ERA5 по приземной температуре воздуха
Fig. 1. Area with coordinates of 30° – 72°N, 10°W – 42°E
where re-analysis ERA5 data concerning surface air temperature were used

Годы «сильных» событий ИД были разделены на те, во время которых: отсутствовали «сильные» события ЭНЮК; присутствовали «сильные» события Ла Ниньо; присутствовали «сильные» события Эль-Ниньо. Годы ИД, для которых отсутствовали «сильные» события ЭНЮК, далее в работе будут обозначаться как независимые события ИД. Для временного ряда DMI за период 1959 – 2020 гг., для каждого месяца вычислялось среднеквадратическое отклонение (σ) и дисперсия (σ^2).

Для лет, во время которых отсутствовали значимые тихоокеанские проявления, были отобраны годы, в которых значение модуля индекса ИД превышало 0,4σ. Для полученных выборок, соответствующих положительной и отрицательной фазе ИД, строились средние по выборке поля аномалий ПТВ и разностный композит, как разность между ними.

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 представлены все случаи возникновения наиболее «сильных» событий ИД за период 1959–2020 гг., как совпадающие, так и не совпадающие с «сильными» событиями ЭНЮК. Показано, что 18 из 29 событий ИД (т.е. более 60%) возникали в отсутствии значимых тихоокеанских проявлений, что совпадает с выводами работы [21]. Причиной генерации ИД, независимого от ЭНЮК может быть спорадически возникающая в экваториально-тропической зоне Индийского океана неустойчивость системы зональных течений [22]. Следует отметить, что «тепловые волны», зарегистрированные в 2006, 2017, 2017 и 2019 гг., приходятся именно на годы ИД, во время которых индекс Niño 3.4 $\leq$ 1. При этом, летом во время «heat wave» 2003 г. также наблюдался ИД в отсутствии «сильных» событий ЭНЮК, но с индексом DMI < 0,4. На рис. 2 изображено пространственное распределение аномалий ПТВ в месяцы максимального развития положительной фазы независимых

от ЭНЮК «сильных» событий ИД, в том числе во время «тепловых волн» 2006, 2017 и 2019 гг.

Можно заметить, что над западной и центральной частью Европы (а для мощного ИД 2019 года, когда DMI превысил 1,1, и в ее восточной части) положительные аномалии ПТВ достигают значений в 3–4°С. Ввиду отсутствия в эти месяцы значимых событий ЭНЮК, можно сделать вывод, что за рост величин аномалий ПТВ в летне-осенний период с некоторой вероятностью (которая будет оценена ниже) ответственны именно процессы в экваториально-тропической зоне Индийского океана, т.е. события ИД.

Таблица 1. Годы «сильных» (когда наблюдалось не менее 3 месяцев с индексом DMI ≥ 0,4 по абсолютной величине) событий ИД во время которых: черным – отсутствовали «сильные» события ЭНЮК; зеленым – присутствовали «сильные» события Ла Ниньо; красным – присутствовали «сильные» события Эль-Ниньо (т.е. когда повторялось не менее 3 месяцев, в течение которых индекс Niño 3.4 был ≥ 1).

Годы ИД (негативная фаза)	1959	1960	1964	1971	1973	1974	1978	1980
	1981	1983	1985	1989	1996	1998	2016	
Годы ИД (позитивная фаза)	1961	1962	1963	1972	1982	1983	1994	1997
	2006	2011	2012	2015	2017	2018	2019	

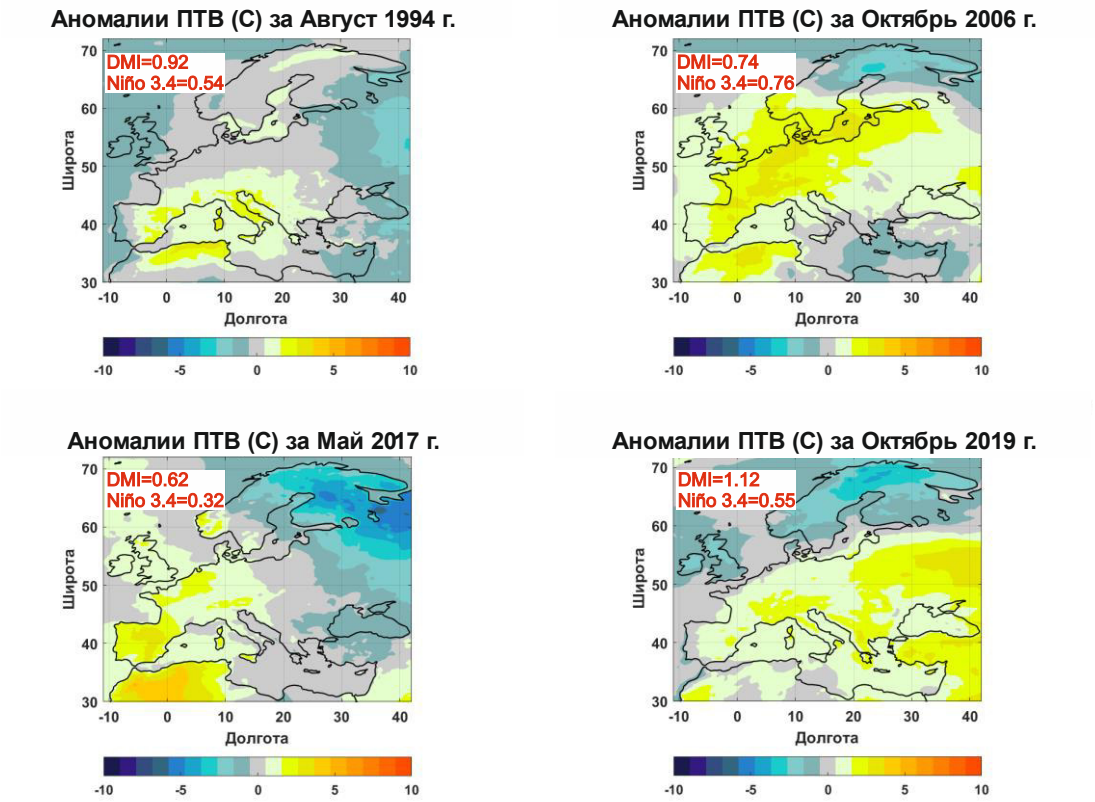


Рис. 2. Аномалии приземной температуры воздуха за период 1959–2020 гг. в месяцы максимального развития положительной фазы независимых от ЭНЮК событий ИД 1994, 2006, 2017, 2019 гг.

Fig. 2. Surface air temperature anomalies for the period 1959–2020 in the months of maximum development of positive IOD events 1994, 2006, 2017, 2019 independent of ENSO

На рис. 3 изображено пространственное распределение аномалий ПТВ в месяцы максимального развития отрицательной фазы независимых от ЭНЮК, «сильных» событий ИД 1959, 1980, 1981 и 1996 годов. В отличие от положительной фазы ИД эти годы, наоборот, характеризуются ростом (по абсолютной величине) отрицательных аномалий ПТВ почти над всем исследуемым регионом. Наиболее интенсивные аномалии (до –(4–5)°С) отмечены на востоке региона, что совпадает с результатами работ [16, 17]. Исключение составляет север Европы, где наоборот наблюдается увеличение положительных аномалий до 2–3°С. Следует отметить, что с увеличением DMI по абсолютному значению область положительных аномалий увеличивается. Этот результат говорит о том, что аномалии ТПО в период негативной фазы ИД могут не менее значимо влиять на климатические аномалии над Европой, чем в период позитивной фазы.

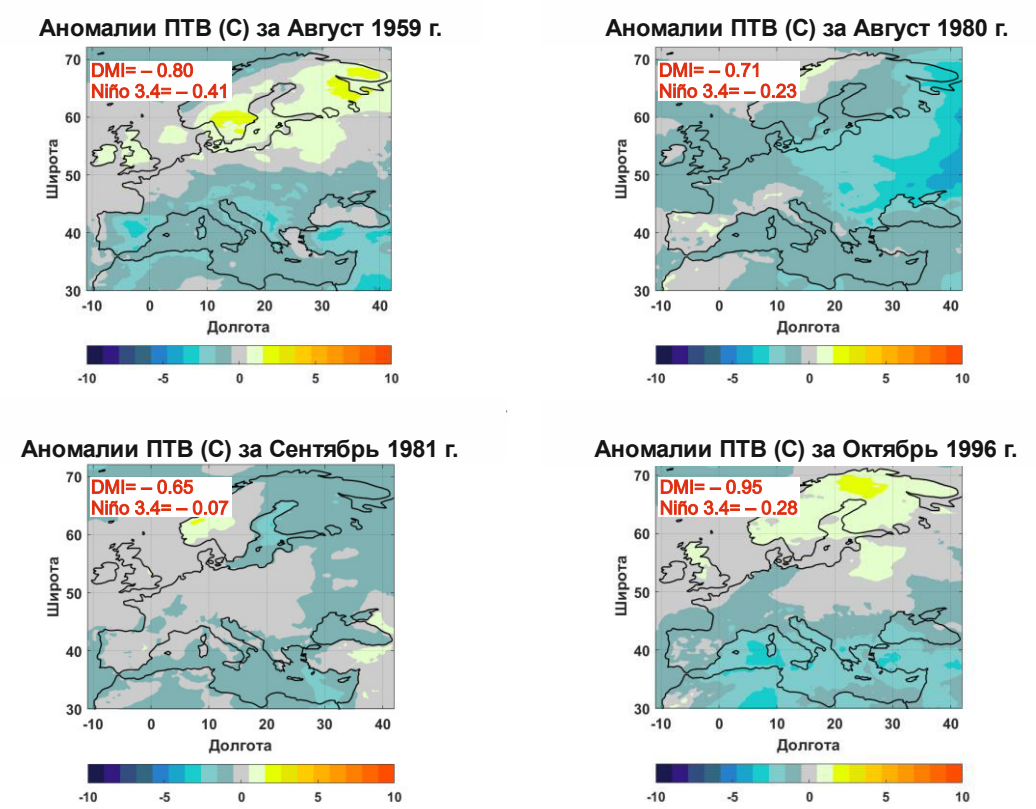


Рис. 3. Аномалии приземной температуры воздуха за период 1959–2020 гг. в месяцы максимального развития отрицательной фазы независимых от ЭНЮК событий ИД 1959, 1980, 1981, 1996 гг.
Fig. 3. Surface air temperature anomalies for the period 1959–2020 in the months of maximum development of negative IOD events 1959, 1980, 1981, 1996 independent of ENSO

Для оценки вероятности реальности приведенных выше результатов обратимся к разностным композитам между выборками аномалий ПТВ, соответствующих положительной и отрицательной фазам ИД (для лет, когда отсутствовали сильные тихоокеанские проявления, и значение модуля DMI превышало 0,4σ). Часть разностных композитов для отдельных месяцев приведена на рис. 4.

Наиболее значимые обширные аномалии ПТВ наблюдаются в период максимального развития ИД над западной, центральной и восточной частями Европы между июнем и сентябрем. Можно отметить, что в июне значимый

сигнал обнаруживается и в южной части исследуемой области. Он еще более выражен в мае (рисунок для мая не приведен, т.к. выборка для этого месяца содержит всего три события ИД в положительной фазе, удовлетворяющих выбранным критериям). Это подтверждает положительную связь между конвективными процессами над Северной Африкой, возникающими во время положительной фазы ИД, и аномалиями ПТВ над Европейским регионом. Над Скандинавией преобладают небольшие по абсолютной величине и незначимые аномалии противоположного знака. К сентябрю область значимых аномалий ПТВ расширяется в восточном направлении, сокращаясь при этом на западе.

Необходимо отметить увеличение уровня значимости выделенного сигнала от поздней весны к началу осени, когда ПТВ над большей частью Центральной и Восточной Европы характеризуется значимым на 95% уровне откликом на ИД. В октябре в полях разностного композита ПТВ количество точек регулярной сетки, в которых результат статистически значим, резко уменьшается над Европейским континентом между 15° и 35° в.д.

При этом их количество увеличивается в окрестности 50°– 55° с. ш., и 35°–40° в.д. (рисунок для октября не приведен). Другими словами, в октябре продолжается смещение области значимых аномалий ПТВ, индуцируемых событиями ИД, в восточном направлении.

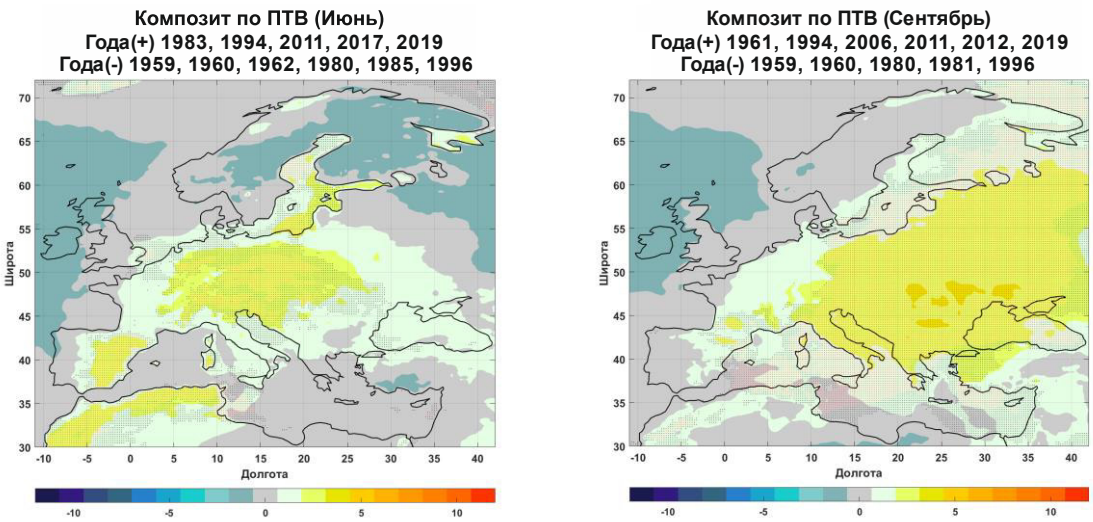


Рис. 4. Разностный композит между аномалиями ПТВ, соответствующими положительной (+) и отрицательной (-) фазам ИД (для лет, когда отсутствовали значимые тихоокеанские проявления, в которых значение модуля DMI превышало 0,4σ) и полем аномалий ПТВ. Черными точками обозначены области, где результат значим на уровне 90%, красными точками - на 95% уровне
Fig. 4. Composite between the anomalies of surface air temperature corresponding to the positive (+) and negative (-) phases of the IOD (for years during which there were no significant Pacific events, where the DMI module value exceeded 0.4σ) and the field anomalies of surface air temperature. Black points of the area where the result is significant at the 90% level, red points - at the 95% level

Заключение. Таким образом, выделен статистически значимый сигнал в поле приземной температуры над Европейским регионом в летне-осенний период, связанный с ИД. Установлено, что в месяцы развития сильных положительных событий ИД (с индексом DMI ≥ 0,4 по абсолютному значению) положительные аномалии температуры достигают +(3–4)°С в том числе и в годы «тепловых волн». В отрицательную фазу ИД, наоборот, наблюдается рост величин от-

рицательных аномалий температуры (до –(4–5)°С) над всей территорией Европейского региона, за исключением его северной части, где обнаружены положительные аномалии. Влияние ИД на климатическую изменчивость исследуемого региона, скорее всего, сводится к возбуждению атмосферных возмущений над Индийским океаном в период зрелой фазы осцилляции, и последующему их распространению на Атлантико-Европейский регион. Как показано в многочисленных работах (например, [22, 23]), этот механизм эффективно реализуется при развитии термической аномалии в Тихом океане в период зрелой фазы ЭНЮК.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПТС по теме «Фундаментальные исследования процессов в климатической системе, определяющих пространственно-временную изменчивость природной среды глобального и регионального масштабов (№ госрегистрации 121122300074-7) и при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00183.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Saji N.H., Goswami B.N., Vinayachandran P.N., Yamagata T.* A dipole mode in the tropical Indian Ocean // Nature. 1999. Vol. 401 (6751). P. 360–363

2. *Vinayachandran P.N., Lizuka S., Yamagata T.* Indian Ocean dipole mode events in an ocean general circulation model // Deep Sea Res. 2002. Part II. Vol. 49 (7). P. 1573–1596.

3. *Conway D., Allison E.H., Felstead R., and Goulden M.* Rainfall variability in East Africa: implications for natural resources management and livelihoods // Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences. 2005. Vol. 363 (1826). P. 49–54.

4. *Page S.E., Siegert F., Rieley J., Boehm H.V., Jaya A., and Limin S.* The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997 // Nature. 2002. Vol. 420 (6911). P. 61–65.

5. *Ummenhofer C.C., England M.H., McIntosh P.C., Meyers G.M., Pook M.J., Risbey J.S., Gupta A.S., and Taschetto A.S.* What causes southeast Australia's worst droughts? // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36 (4). P. 1–5.

6. *Wang G., Cai W.* Two-year consecutive concurrences of positive Indian Ocean Dipole and Central Pacific El Niño preconditioned the 2019/2020 Australian "black summer" bushfires // Geoscience Letters. 2020. Vol. 7(1). P. 1–9.

7. *Schär C., Jendritzky G.* Hot news from summer 2003 // Nature. 2004. Vol. 432, P. 559–560.

8. *Stott P. A., Stone D. A., Allen M. R.* Human contribution to the European heatwave of 2003 // Nature. 2004. Vol. 432, P. 610–614.

9. *Black E., Blackburn M., Harrison G.* Factors contributing to the summer 2003 European heatwave // Weather. 2004. Vol. 59(8). P. 217–223.

10. *Ferranti L., Viterbo P.* The European summer of 2003: Sensitivity to soil water initial conditions // Journal of Climate. 2006. Vol. 19 (15). P. 3659–3680.

11. *Luterbacher J., Dietrich D.* European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500 // Science. 2004. Vol. 303 (5663). P. 1499–1503.

12. *Struzewska J., Kaminski J. V.* Formation and transport of photooxidants over Europe during the July 2006 heat wave - Observations and GEM-AQ model simulations // Atmospheric Chemistry and Physics, 2008. Vol. 8 (3). P. 721–736.

13. *Benítez A.S., Goessling H., Pithan F.* The July 2019 European Heat Wave in a Warmer Climate: Storyline Scenarios with a Coupled Model Using Spectral Nudging // Journal of Climate. 2022. Vol. 35 (8). P. 1–51.

14. *Osman M., Zaitchik B., Badr H.* North Atlantic centers of action and seasonal to subseasonal temperature variability in Europe and eastern North America // Int.

Journal of Climatology. 2021. Vol. 41 (1). P.1775–1790.

15. *Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В.* Современная классификация Эль-Ниньо и сопоставление соответствующих климатических откликов в Атлантико-Евразийском регионе // Системы контроля окружающей среды. 2017. Вып. 1 (27). С. 94–100.

16. *Полонский А.Б., Торбинский А.В., Башарин Д.В.* Влияние Северо-Атлантического колебания, Эль-Ниньо — Южного колебания и Индоокеанского диполя на пространственно-временную изменчивость приземной температуры воздуха и атмосферного давления Средиземноморско-Черноморского региона // Вестник Одесского государственного экологического университета. 2008. № 6. С. 181–197.

17. *Полонский А.Б.* Отклик в полях приземной температуры воздуха, давления и осадков Евразийского региона на аномалии температуры поверхности океана, связанные с Индоокеанским диполем // Системы контроля окружающей среды. 2018. № 1 (31). С. 83–89.

18. *Полонский А.Б., Торбинский А.В.* Оценка влияния Индоокеанского диполя на летние стоки р. Дунай // Системы контроля окружающей среды. 2018. Вып. 4 (34). С. 89–93.

19. Электронный ресурс: https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Data/dmi.had.long.data (дата обращения: 05.08.2022).

20. Электронный ресурс: https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.anom.data (дата обращения: 05.08.2022).

21. *Rao S.A., Behera M., Masumoto Y., Yamagata T.* Subsurface interannual variability associated with the Indian Ocean Dipole // *Clivar Exchanges.* 2002. Vol. 7(1). P. 12–17.

22. *Polonsky A.B, Torbinsky A.V.* The IOD–ENSO Interaction: The Role of the Indian Ocean Current's System // Atmosphere. 2021. Vol. 12, No. 12. P.1662.

23. *Bulić I. H., Kucharski F.* Delayed ENSO Impact on Spring Precipitation over North/Atlantic European Region // Climate Dynamics. 2012. Vol. 38(11–12). P. 2593–2612.

RESPONSE IN SURFACE AIR TEMPERATURE FIELDS OF EUROPE TO THE INDIAN OCEAN DIPOLE

A.B. Polonsky, A.V. Torbinsky, A.V. Gubarev

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

The aim of this work is to study the influence of the Indian Ocean Dipole (IOD) events, which are independent of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on spatiotemporal variability of surface air temperature (SAT) in the European region. ERA5 atmospheric reanalysis data on monthly mean air surface temperature values, as well as IOD and ENSO indices for the period 1959–2020, were used. It has been found that during the development of the positive phase of intense IOD events, extensive positive temperature anomalies over Europe reach +(3–4)°C. On the contrary, in the negative phase of IOD, an increase in the absolute value of negative SAT anomalies (up to –(4–5)°C) is observed over the most part of the European region.

Keywords: Indian Ocean dipole, El Niño-Southern Oscillation, surface air temperature, European region.

REFERENCES

1. *Saji N.H., Goswami B.N., Vinayachandran P.N., and Yamagata T.* A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature,* 1999, Vol. 401 (6751), pp. 360–363.

2. *Vinayachandran P.N., Lizuka S., and Yamagata T.* Indian Ocean dipole mode events in an ocean general circulation model. *Deep Sea Res,* 2002, Part II, Vol. 49 (7), pp. 1573–1596.

3. *Conway D., Allison E.H., Felstead R., and Goulden M.* Rainfall variability in East Africa: implications for natural resources management and livelihoods. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2005, Vol. 363 (1826), pp. 49–54.

4. *Page S.E., Siegert F., Rieley J., Boehm H.V., Jaya A., and Limin S.* The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature,* 2002, Vol. 420 (6911), pp. 61–65.

5. *Ummenhofer C.C., England M.H., McIntosh P.C., Meyers G.M., Pook M.J., Risbey J.S., Gupta A.S., and Taschetto A.S.* What causes southeast Australia's worst droughts? *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36 (4).

6. *Wang G., Cai W.* Two-year consecutive concurrences of positive Indian Ocean Dipole and Central Pacific El Niño preconditioned the 2019/2020 Australian "black summer" bushfires. *Geoscience Letters,* 2020, Vol. 7 (1), pp. 1–9.

7. *Schär C., Jendritzky G.* Hot news from summer 2003. *Nature*, 2004, Vol. 432, pp. 559–560.

8. *Stott P. A., Stone D. A., Allen M. R.* Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 2004. Vol. 432, pp. 610–614.

9. *Black E., Blackburn M., Harrison G*. Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather*, 2004, Vol. 59 (8), pp. 217–223.

10. *Ferranti L., Viterbo. P.* The European summer of 2003: Sensitivity to soil water initial conditions. *Journal of Climate*, 2006, Vol. 19 (15), pp. 3659–3680.

11. *Luterbacher J., Dietrich D.* European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science*, 2004, Vol. 303 (5663), pp.1499–1503.

12. *Struzewska J., Kaminski J. V.* Formation and transport of photooxidants over Europe during the July 2006 heat wave - Observations and GEM-AQ model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, Vol. 8 (3), pp. 721–736.

13. *Benítez A.S., Goessling H., Pithan F.* The July 2019 European Heat Wave in a Warmer Climate: Storyline Scenarios with a Coupled Model Using Spectral Nudging. *Journal of Climate*, 2022, Vol. 35 (8), pp. 1–51.

14. *Osman M., Zaitchik B., Badr H.* North Atlantic centers of action and seasonal to subseasonal temperature variability in Europe and eastern North America. *Int. Journal of Climatology,* 2021, Vol. 41 (1), pp.1775–1790.

15. *Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V.* Sovremennaya klassifikaciya El'-Nino i sopostavlenie sootvetstvuyushchih klimaticheskih otklikov v Atlantiko-Evrazijskom regione (Recent El-Nino classification and associated climate response comparisons for the Atlantic-Eurasian region). *Sistemy kontrolja okruzhayshej sredy,* 2017, No. 1(27), pp. 94–100.

16. *Polonskiy A.B., Torbinskiy A.V., Basharin D.V.* Vlijanie Severo-Atlanticheskogo kolebaniya, El-Nino — Yuzhnogo kolebaniya i Indookeanskogo dipolya na prostranstvenno-vremennuyu izmenchivost prizemnoy temperaturi vozduha i atmosfernogo davleniya Sredizemnomorsko-Chernomorskogo regiona *(*The influence of North Atlantic oscillation, El-Nino/Southern oscillation and Indian dipole on spatial-temporal variability of the surface air temperature and pressure over Mediterranean-Black Sea region*). Vestnik Odesskogo gosudarstvennogo ekologicheskogo universiteta,* 2008, No. 6, pp.181–197.

17. *Polonskiy A.B.* Otklik v poljah prizemnoy temperaturi vozduha, davlenija i osadkov Yevraziyskogo regiona na anomalii temperaturi poverhnosti okeana, svyazannie s Indookeanskim dipole (Response of the Eurasian surface temperature, pressure and precipitation on the Indo-ocean dipole). *Sistemy kontrolja okruzhayshej sredy,* 2018, No. 1(31), pp. 83–89.

18. *Polonskiy A.B., Torbinskiy A.V.* Otsenka vliyanija Indookeanskogo dipolja na letnie stoki r. Dunay (Evaluation of the influence of the Indian ocean dipole on the run off of the river Danub). *Sistemy kontrolja okruzhayshej sredy,* 2018, No. 4(34), pp. 89–93.

19. https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Data/dmi.had.long.data (August 05, 2022).

20. https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Data/nino34.long.anom.data (August 05, 2022).

21. *Rao S.A., Behera M., Masumoto Y., Yamagata T.* Subsurface interannual variability associated with the Indian Ocean Dipole. *Clivar Exchanges*, 2002, No. 7(1), pp. 12–17.

22. *Polonsky A.B, Torbinsky A.V.* The IOD–ENSO Interaction: The Role of the Indian Ocean Current's System // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, No. 12. P.1662

23. *Bulić I. H., Kucharski F.* Delayed ENSO Impact on Spring Precipitation over North/Atlantic European Region. *Climate Dynamics*, 2012, No. 7(11–12), pp. 2593–2612.

УДК 551.465.7(261.1) DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-15-24

АНАЛИЗ АСИММЕТРИИ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРХНЕГО СЛОЯ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ РЕ-АНАЛИЗА ORA-S3

П.А. Сухонос

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

Межгодовые аномалии температуры и толщины верхнего перемешанного слоя (ВПС), суммарного потока тепла на поверхности океана и модуля касательного напряжения трения ветра по данным океанического ре-анализа ORA-S3 в период 1980–2011 гг. в ряде регионов Северной Атлантики обладают негауссовой изменчивостью. В области к югу от Азорских островов распределение аномалий указанных характеристик имеет значимую положительную асимметрию. Положительная асимметрия аномалий температуры ВПС возникает из-за положительной асимметрии в изменчивости суммарного потока тепла на поверхности океана и толщины ВПС – составляющих главного слагаемого теплового баланса ВПС.

Ключевые слова: негауссовость, тепловой баланс, верхний перемешанный слой, Северная Атлантика

Поступила в редакцию: 12.09.2022. После доработки: 11.11.2022.

Введение. Характерной особенностью климатической системы является её негауссовость [1]. Ненулевая асимметрия определяет скошенность функции плотности вероятности (ФПВ) и достаточна для демонстрации негауссовости. На суточных масштабах наблюдения с океанских станций погоды показывают, что ФПВ аномалий температуры поверхности океана (ТПО) в значительной степени не являются гауссовыми [2]. Стохастически–динамическое представление о негауссовой изменчивости ТПО в Мировом океане показало, что динамика негауссовой изменчивости ТПО определяется линейным стохастическим дифференциальным уравнением с линейным мультипликативным шумом [3]. Однако теория, представленная в цитируемой работе, не даёт оценок параметров стохастической модели, приуроченных к конкретным физическим процессам. Величины этих параметров и определяют знак и величины коэффициентов асимметрии и эксцесса, присущих отдельному региону. Авторы [3] применили идеи статистической механики к анализу изменчивости ТПО, пренебрегая локальной динамикой.

Как известно, вдали от интенсивных течений потоки тепла между атмосферой и океаном оказывают определяющее влияние на возникновение аномалий ТПО. По мнению авторов работ [2, 4], ФПВ аномалий ТПО, сформированных только за счёт аномалий потоков тепла на поверхности океана, будет иметь положительную асимметрию. Этот вывод подтверждается с помощью простых моделей локального взаимодействия атмосферы и океана [5]. Однако негауссовый характер ФПВ аномалий температуры верхнего перемешанного слоя (ВПС) может быть обусловлен и другими составляющими баланса тепла ВПС. Кроме того, ярко выраженная сезонность толщины ВПС и характеристик атмосферного воздействия также может вносить свой вклад в формирование негауссовой изменчивости ТПО.

Анализ девяти массивов океанографических данных показал, что коэффициенты асимметрии и эксцесса межгодовых аномалий ТПО за период 1980–2011 гг. во многих регионах Северной Атлантики не соответствуют гауссовому распределению [6]. Причем пространственное распределение этих коэффициентов имеет чётко определенную и простран-

ственно когерентную структуру. Одним из таких регионов является область с положительными коэффициентами асимметрии аномалий ТПО в восточной части субтропического круговорота, расположенная к югу от Азорских островов. Цель статьи – выявить причину положительной асимметрии аномалий ТПО в этой области с привлечением анализа величин слагаемых уравнения теплового баланса ВПС.

Данные и методы. В работе использованы среднемесячные данные из массива ре-анализа океана ORA-S3 с 1959 по 2011 гг. [7]. Данные о касательном напряжении трения ветра и суммарном потоке тепла на поверхности океана получены из массива ре-анализа атмосферы ERA-40 [8] и оперативного анализа по модели ERA-40. Эти потоки тепла и импульса использованы в качестве граничных условий на поверхности океана в ре-анализе ORA-S3. Указанный массив данных содержит полный набор параметров системы океан–атмосфера, по которому можно рассчитать все слагаемые замкнутого уравнения баланса тепла ВПС океана.

Исследования проводились для акватории Северной Атлантики, ограниченной координатами 0–65° с. ш. 8–80° з. д., за период 1980–2011 гг. Из временных рядов за указанный период в каждом узле пространственной сетки удалён линейный тренд для каждого календарного месяца. Коэффициенты тренда рассчитывались по методу наименьших квадратов. Далее выполнено нормирование значений за каждый месяц на среднее квадратическое отклонение (СКО) межгодовых изменений за указанный период для этого месяца. После этого по полученным среднемесячным рядам рассчитаны коэффициенты асимметрии в каждом узле пространственной сетки. Если правый хвост распределения длиннее левого, то коэффициент асимметрии положителен и наоборот. Если распределение симметрично относительно математического ожидания, то его коэффициент асимметрии равен нулю. Стандартные ошибки (*standard errors (SE)*) асимметрии определялись по формуле $SE(skew) \approx sqrt(6/N_{eff})$, где N_{eff} — эффективное число независимых наблюдений [9]. При условии нормального распределения случайной величины около 95% всех её значений сосредоточено в интервале ± две стандартные ошибки (±2*SE*), что можно считать доверительным интервалом. Эта оценка не учитывает пространственную когерентность коэффициентов асимметрии.

Уравнение теплового баланса ВПС в предположении о вертикальной однородности температуры в этом слое имеет следующий вид

$$T_t + UT_x + VT_y + \frac{(T - T_{-H}) \cdot W'_{-H}}{H} - \frac{Q_0 - Q_{-H}}{\rho_0 C_P H} - HED = 0 .$$

Здесь ρ_0 – плотность морской воды в ВПС, C_P – теплоемкость морской воды при постоянном давлении, H и T – толщина и температура ВПС, U и V – средние в пределах ВПС зональная и меридиональная компоненты вектора течений, W'_{-H} – вертикальная скорость течений, нормальная к топографии нижней границы ВПС, с учетом его горизонтальной неоднородности, T_x и T_y – зональный и меридиональный градиенты температуры ВПС, T_t – частная производная температуры ВПС, UT_x и VT_y – зональная и меридиональная адвекция тепла в пределах ВПС, $(T–T_{-H})\cdot W'_{-H}/H$ – вертикальная адвекция тепла на нижней границе ВПС, Q_0 и Q_{-H} – тепловые потоки на верхней и нижней границах ВПС.

Поток тепла на нижней границе ВПС Q_{-H} зависит от скорости заглубления ВПС (H_t), скачка температуры ($T – T_{-H}$) и скорости вертикальных движений у его основания и оценивается из обобщённого на случай горизонтально-неоднородного океана соотношения Крауса – Тернера [10]. Последнее слагаемое в левой части уравнения баланса тепла ВПС –

HED (horizontal eddy diffusivity) – характеризует горизонтальную вихревую диффузию тепла, которая определялась согласно [11]. Более подробно методика расчёта компонентов теплового баланса ВПС изложена в [12].

Начало системы координат находится на невозмущенной поверхности океана. Ось x направлена на восток, ось y – на север, ось z – вверх.

Температура ВПС определяется как средняя температура в слое от поверхности океана до нижней границы ВПС, положение которой переменно по пространству и времени. В рамках интегральной модели верхнего слоя океана температура ВПС предполагается постоянной по глубине в пределах ВПС и в точности соответствует ТПО. Под ТПО понимается температура на самом верхнем горизонте (5 м) в используемом массиве данных.

Типичная величина погрешностей расчета различных слагаемых уравнения теплового баланса ВПС составляет порядка 10%. В отдельных областях в высоких широтах в зимний период типичная погрешность оценки величин потоков тепла на нижней границе ВПС может достигать 50% вследствие низкого пространственно–временного разрешения доступных данных ре-анализа.

Все перечисленные слагаемые оценивались для каждого месяца за период 1980–2011 гг. Затем рассчитывалась дисперсия компонентов баланса тепла по среднемесячным величинам во все месяцы года за исследуемый период. После этого определялся вклад дисперсии отдельных составляющих в суммарную дисперсию левой части уравнения теплового баланса ВПС в эти месяцы.

Результаты. Пространственное распределение коэффициентов асимметрии временных рядов ТПО, суммарного потока тепла на поверхности океана, толщины ВПС и модуля касательного напряжения трения ветра за период 1980 – 2011 гг. в Северной Атлантике имеет следующие особенности (рис. 1). В поле коэффициентов асимметрии аномалий ТПО по используемым данным выделяются области с отрицательными величинами (рис. 1а). К ним относятся: восточная часть экваториальной зоны Атлантического океана, область перехода Гольфстрима в Североатлантическое течение и области к югу от Исландии. Область отрицательных коэффициентов асимметрии ТПО в системе Гольфстрим–Североатлантическое течение может плохо проявляться из-за грубого пространственного разрешения исходных данных. Наблюдаемая негауссова изменчивость ТПО в этом регионе хорошо описывается стохастической адвекцией аномалий ТПО в идеализированном зональном течении [4]. Области положительных коэффициентов асимметрии аномалий ТПО расположены к северо–востоку от Южной Америки и к югу от Азорских островов. Отметим, что положительная асимметрия в распределении аномалий ТПО в области к югу от Азорских островов особенно сильно выражена летом, что согласуется с результатами [4, 6].

Положительные коэффициенты асимметрии аномалий суммарного потока тепла на поверхности океана сосредоточены в окрестности западноафриканского апвеллинга, области к югу от Азорских островов и интенсивных течениях к северу от 30° с. ш. (рис. 1б). К ним относятся: система Гольфстрим–Североатлантическое течение, Восточно–Гренландское и Лабрадорское течения. Области отрицательных коэффициентов асимметрии аномалий суммарного потока тепла на поверхности океана расположены у северного побережья Южной Америки и малы по площади.

Обширная область положительных коэффициентов асимметрии аномалий толщины ВПС расположена в центральной части субполярного круговорота (рис. 1в). Несмотря на не самые высокие средние многолетние значения толщины ВПС здесь, положительная асимметрия аномалий толщины ВПС возникает из-за развития глубокой конвекции в осенне–зимние месяцы. Отмечаются положительные коэффициенты асимметрии аномалий толщины ВПС в восточной части Северной Атлантики и области к югу от Азорских островов. Области отрицательных коэффициентов асимметрии аномалий толщины ВПС расположены между Северной Америкой и Гренландией.

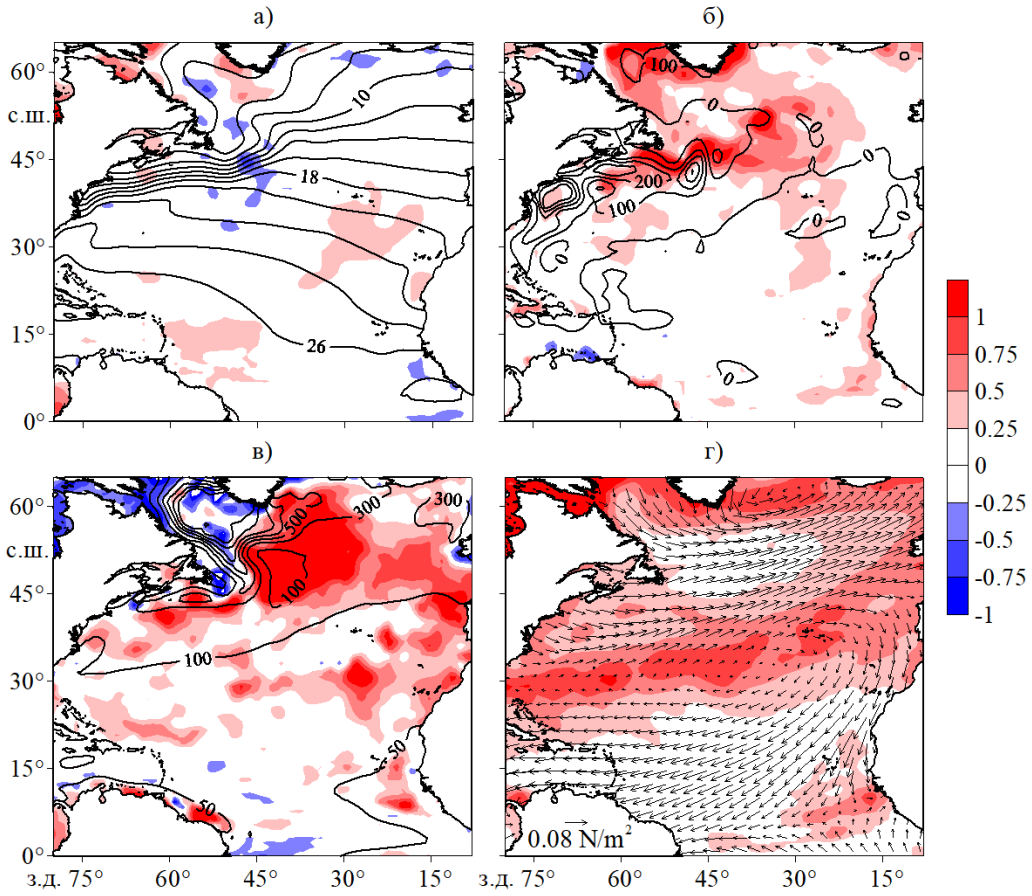


Рис. 1. Коэффициенты асимметрии аномалий ТПО (а), аномалий суммарного потока тепла на поверхности океана (б), аномалий толщины ВПС (в) и аномалий модуля касательного напряжения трения ветра (г) за период 1980–2011 гг. Показаны только значимые на 95% уровне доверия величины. Изолиниями на рис. а, б, в и векторами на рис. г показаны средние многолетние величины

Fig. 1. Skewness of ocean surface temperature anomaly (a), net surface heat flux anomaly (b), the upper mixed layer (UML) depth anomaly (c) and wind stress modulus anomaly (d) for the period 1980–2011. Only values that are significant at the 95% confidence level are shown. The isolines in figs. a, b, c and vectors in fig. d show long-term average values

Положительные коэффициенты асимметрии аномалий модуля касательного напряжения трения ветра расположены в тех регионах, где средние величины этого параметра малы (рис. 1г). К ним относятся: область между северо-восточным и юго-восточным пассатами, область между северо-восточными пассатами и Западными ветрами, область между восточными ветрами и Западными ветрами. Отрицательные коэффициенты асимметрии аномалий рассматриваемого параметра не обнаружены.

Таким образом, изучаемые параметры системы ВПС–приводный слой атмосферы в ряде регионов Северной Атлантики обладают негауссовой изменчивостью. В области к югу от Азорских островов распределение всех рассматриваемых характеристик имеет значимую положительную асимметрию. Рассмотрим временные зависимости между аномалиями этих параметров в этой области.

В области к югу от Азорских островов была выбрана трапеция 2°×2° с центром в 30° с. ш. 30° з. д. Получены линейные зависимости между аномалиями исследуемых параметров за период 1980–2011 гг. Поскольку рассматриваемые характеристики не являются нормально распределёнными, то для выявления тесноты связей между ними используется ранговая корреляция Спирмена.

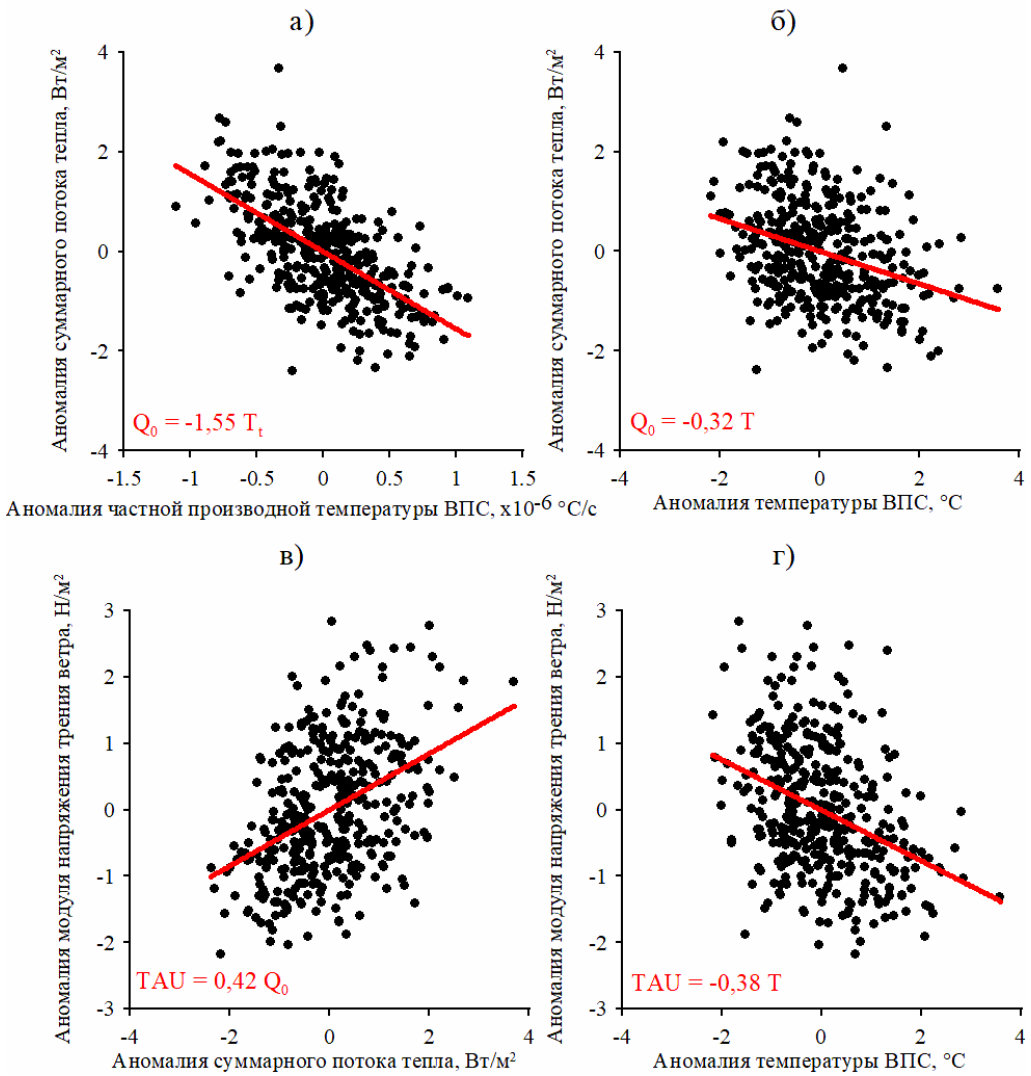


Рис. 2. Зависимость аномалий суммарного потока тепла на поверхности океана (Q_0) от аномалий частной производной температуры ВПС (T_t) (а), аномалий суммарного потока тепла на поверхности океана (Q_0) от аномалий температуры ВПС (T) при лидировании потока тепла на 1 месяц (б), аномалий модуля касательного напряжения трения ветра (TAU) от аномалий суммарного потока тепла на поверхности океана (Q_0) (в) и аномалий модуля касательного напряжения трения ветра (TAU) от аномалий температуры ВПС (T) при лидировании модуля касательного напряжения трения ветра на 1 месяц (г) в трапеции 2°×2° с координатами центра 30° с. ш. 30° з. д. в период 1980–2011 гг. Прямые красные линии – линейная аппроксимация

Fig. 2. Dependence of the net surface heat flux anomalies (Q_0) on the anomalies of the UML temperature partial derivative (T_t) (a), the net surface heat flux anomalies (Q_0) on the UML temperature anomalies (T) when the heat flux leading for 1 month (b), the wind stress modulus anomalies (TAU) on the net surface heat flux anomalies (Q_0) (c) and the wind stress modulus anomalies (TAU) on the UML temperature anomalies (T) when the wind stress modulus leading for 1 month (d) in a trapezoid 2°×2° with center coordinates 30° N 30°W in the period 1980–2011. Straight red lines – linear approximation

Аномалии частной производной температуры ВПС и суммарного потока тепла на поверхности океана имеют синхронную отрицательную связь с коэффициентом корреляции равным –0,63 (рис. 2а). Отток тепла с поверхности океана (Q_0>0) вызывает уменьшение скорости потепления ВПС (T_t<0) и наоборот. Аномалии частной производной температуры ВПС и толщины ВПС значимую синхронную связь не имеют. При лидировании частной производной

температуры ВПС на 1 месяц между этими параметрами возникает отрицательная связь с коэффициентом корреляции равным –0,43. Уменьшение скорости потепления ВПС (T_t<0) сопровождается заглублением ВПС (H>0) на следующий месяц и наоборот. Аномалии температуры и толщины ВПС имеют синхронную отрицательную связь с коэффициентом корреляции равным –0,38. Заглубление ВПС (H>0) сопровождается вовлечением холодной воды в ВПС и, как следствие, охлаждением ВПС (T<0) и наоборот. Аномалии суммарного потока тепла на поверхности океана и температуры ВПС значимую синхронную связь не имеют. При лидировании суммарного потока тепла на 1 месяц между этими параметрами возникает отрицательная связь с коэффициентом корреляции равным –0,33 (рис. 2б). Отток тепла с поверхности океана (Q_0>0) сопровождается охлаждением ВПС (T<0) на следующий месяц и наоборот. Аномалии суммарного потока тепла на поверхности океана и модуля касательного напряжения трения ветра имеют синхронную положительную связь с коэффициентом корреляции равным 0,40 (рис. 2в). Аномалии теплового потока тесно связаны с аномалиями скорости ветра [13]. Аномалии модуля касательного напряжения трения ветра и температуры ВПС имеют синхронную отрицательную связь с коэффициентом корреляции равным –0,33. При лидировании ветрового воздействия на 1 месяц между этими параметрами возникает более сильная отрицательная связь с коэффициентом корреляции равным –0,38 (рис. 2г). Интенсификация ветрового воздействия способствует оттоку тепла с поверхности океана и заглублению и охлаждению ВПС, более сильно выраженному на следующий месяц. Такой сдвиг обусловлен термической инерцией ВПС [14, 15].

Таким образом, в области к югу от Азорских островов подтверждается тесная отрицательная связь между аномалиями частной производной температуры ВПС и аномалиями суммарного потока тепла на поверхности океана. Аномалии суммарного потока тепла и модуля касательного напряжения трения ветра, обладающие значимой положительной асимметрией, имеют тесную положительную связь между собой. Аномалии указанных параметров при лидировании на 1 месяц сопровождаются формированием аномалий температуры ВПС противоположного знака.

Рассмотрим далее причины формирования аномалий температуры ВПС в области к югу от Азорских островов с помощью анализа компонентов замкнутого теплового баланса ВПС. Соотношение дисперсий аномалий компонентов теплового баланса ВПС в рассматриваемой области рассчитано для каждого календарного месяца и показано на рис. 3.

Вклад дисперсии аномалий частной производной температуры ВПС в общую дисперсию теплового баланса ВПС минимален в мае и максимален в летние месяцы (6–9%). Рассматриваемая область является малоадвективным регионом: скорости течений и горизонтальные градиенты температуры ВПС малы. Вклад дисперсии аномалий горизонтальной адвекции тепла в ВПС в общую дисперсию теплового баланса ВПС наименьший и регистрируется с января по март (до 3%). Вклад дисперсии аномалий вертикальной адвекции тепла на нижней границе ВПС в общую дисперсию теплового баланса ВПС существенен. Его величина изменяется от 9–12% в апреле и летних месяцах до 35–40% в мае и зимних месяцах.

Вклад дисперсии аномалий суммарного потока тепла на верхней границе ВПС, нормированных на толщину ВПС, в общую дисперсию теплового баланса ВПС наибольший среди остальных слагаемых. В летние месяцы величина этого вклада максимальна и составляет ~50%. С октября по май вклад дисперсии аномалий этого слагаемого в общую изменчивость баланса тепла ВПС насчитывает 25–35%. Вклад дисперсии аномалий потока тепла на нижней границе ВПС в общую дисперсию теплового баланса ВПС невелик и отмечается с августа по декабрь с максимумом в ноябре (7%). В этот период года ВПС интенсивно заглубляется и это приводит к возникно-

вению потока тепла на нижней границе ВПС, вкладом которого нельзя пренебрегать в суммарном балансе тепла ВПС. Вклад дисперсии аномалий горизонтальной вихревой диффузии тепла в общую дисперсию теплового баланса ВПС существенен. В целом вклад дисперсии аномалий этого слагаемого в общую изменчивость баланса тепла ВПС составляет около 30%. Минимальные величины вклада отмечаются в октябре–ноябре (20–25%) и максимальные величины вклада – в марте–апреле (40–45%).

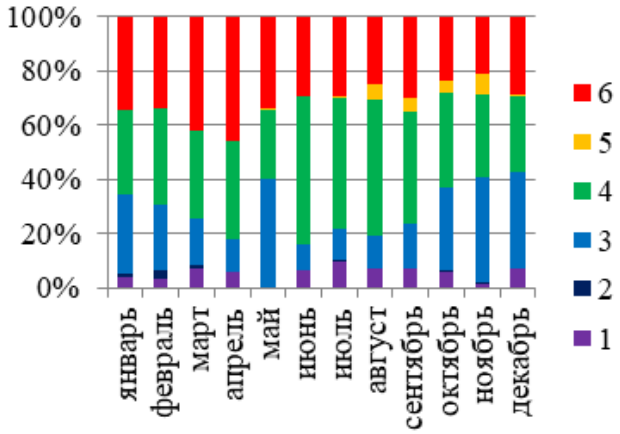


Рис. 3. Вклад дисперсии (%) слагаемых в общую дисперсию теплового баланса ВПС по месяцам в период 1980–2011 гг. в окрестности 30° с. ш. 30° з. д. На рисунке цифрами обозначены компоненты баланса тепла: 1 – частная производная температуры ВПС; 2 – горизонтальная адвекция тепла; 3 – вертикальная адвекция тепла на нижней границе ВПС; 4 – суммарный поток тепла на поверхности океана, нормированный на толщину ВПС; 5 – поток тепла на нижней границе ВПС; 6 – горизонтальная вихревая диффузия тепла

Fig. 3. Contribution of the variance (%) of the terms to the total variance of the UML heat balance by months in the period 1980–2011 in the vicinity of 30° N 30° W. In figure the heat balance components are indicated by numbers: 1 – the UML temperature partial derivative; 2 – horizontal heat advection; 3 – vertical heat advection at the UML lower boundary; 4 – net surface heat flux, normalized to the UML depth; 5 – heat flux at the UML lower boundary; 6 – horizontal eddy diffusivity of heat

Согласно центральной предельной теореме [16], если случайная величина представляет собой результат взаимодействия сравнительно слабых и примерно равноценных факторов, то распределение такой величины при достаточно большом числе факторов стремится к нормальному распределению. Однако если среди множества взаимодействующих факторов есть хотя бы один или два преобладающих фактора, то уже нет оснований утверждать, что случайная величина будет подчиняться нормальному закону. В данном случае аномалия температуры ВПС является результатом взаимодействия всех компонентов теплового баланса ВПС. Один из компонентов (суммарный поток тепла на верхней границе ВПС, нормированный на толщину ВПС) составляет существенную долю общей дисперсии баланса тепла ВПС в годовом цикле (от ~30% в холодный период года до ~50% в теплый период года в области к югу от Азорских островов). Причем оба составляющих этого компонента баланса тепла ВПС (суммарный поток тепла на поверхности океана и толщина ВПС) характеризуются значимой положительной асимметрией в рассматриваемой области. ФПВ межгодовых аномалий других компонентов теплового баланса ВПС не проявляют значимой асимметрии. На основании этого можно заключить, что положительная асимметрия аномалий температуры ВПС в области к югу от Азорских островов в основном возникает за счёт наличия положительной асимметрии в изменчивости суммарного потока тепла на поверхности океана и толщины ВПС – составляющих главного компонента теплового баланса ВПС.

Заключение. Температура и толщина ВПС, суммарный поток тепла на поверхности океана и модуль касательного напряжения трения ветра в ряде регионов Северной Атлантики обладают негауссовой изменчивостью. В области к югу от Азорских островов ФПВ межгодовых аномалий всех указанных характеристик имеет значимую положительную асимметрию.

В обозначенной области подтверждается тесная отрицательная связь между аномалиями частной производной температуры ВПС и аномалиями суммарного потока тепла на поверхности океана. Аномалии суммарного потока тепла и модуля касательного напряжения трения ветра, обладающие значимой положительной асимметрией, имеют тесную положительную связь между собой. Аномалии указанных параметров при лидировании на 1 месяц сопровождаются формированием аномалий температуры ВПС противоположного знака.

Анализ слагаемых замкнутого уравнения теплового баланса ВПС показал, что в области к югу от Азорских островов важную роль в формировании аномалий температуры ВПС играют процессы локального взаимодействия океана с атмосферой. Изменчивость суммарного потока тепла, нормированного на толщину ВПС, составляет существенную долю общей дисперсии теплового баланса ВПС в годовом цикле. В летние месяцы величина этого вклада максимальна и составляет ~50%.

Таким образом, положительная асимметрия аномалий температуры ВПС в области к югу от Азорских островов в основном возникает за счёт наличия положительной асимметрии в изменчивости суммарного потока тепла на поверхности океана и толщины ВПС – составляющих главного слагаемого теплового баланса ВПС.

Автор выражает глубокую благодарность рецензенту за ценные рекомендации к первому варианту статьи.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pires C.A.L., Hannachi A.* Independent subspace analysis of the sea surface temperature variability: non-gaussian sources and sensitivity to sampling and dimensionality // Complexity. 2017. V. 2017. Article ID 3076810. https://doi.org/10.1155/2017/3076810.

2. *Sura P., Newman M., Alexander M.A.* Daily to decadal sea surface temperature variability driven by state-dependent stochastic heat fluxes // Journal of Physical Oceanography. 2006. V. 36. No. 10. P. 1940–1958. https://doi.org/10.1175/JPO2948.1.

3. *Sura P., Sardeshmukh P.D.* A global view of non-Gaussian SST variability // Journal of Physical Oceanography. 2008. V. 38. No. 3. P. 639–647. https://doi.org/10.1175/2007JPO3761.1.

4. *Sura P.* On non-Gaussian SST variability in the Gulf Stream and other strong currents // Ocean Dynamics. 2010. V. 60. No. 1. P. 155–170. https://doi.org/10.1007/s10236-009-0255-9.

5. *Sura P., Sardeshmukh P.D.* A global view of air–sea thermal coupling and related non-Gaussian SST variability // Atmospheric Research. 2009. V. 94. No. 1. P. 140–149. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.08.008.

6. *Sukhonos P.A., Evstigneev V.P.* Analysis of the non-Gaussianity of the sea surface temperature in the North Atlantic based on reanalysis data // Processes in GeoMedia. 2022. V. 6. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16575-7_57.

7. *Balmaseda M.A., Vidard A., Anderson D.L.T.* The ECMWF Ocean Analysis System: ORA-S3 // Monthly Weather Review. 2008. V. 136. No. 8. P. 3018–3034. https://doi.org/10.1175/2008MWR2433.1.

8. *Uppala S.M., KÅllberg P.W., Simmons A.J. et al.* The ERA-40 re-analysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2005. V. 131. No. 612. P. 2961–3012. https://doi.org/10.1256/qj.04.176.

9. *Brooks C.E.P., Carruthers N.* Handbook of Statistical Methods in Meteorology, London: Her Majesty's Stationery Office, 1953, 412 p.

10. *Kraus E.B.* Modeling and prediction of the upper layers of the ocean, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, pp. 175–208.

11. *Wolff J.-O., Maier-Reimer E., Legutke S.* The ocean primitive equation model. Tech. Rep. No. 13, Hamburg: German Climate Computer Center (DKRZ), 1997, 98 p.

12. *Полонский А.Б., Сухонос П.А.* О вкладе вихревого переноса в среднегодовой бюджет тепла верхнего слоя Северной Атлантики // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 5. С. 597–606. https://doi.org/10.1134/S0002351518050097.

13. *Alexander M.A., Scott J.D.* Surface flux variability over the North Pacific and North Atlantic Oceans // Journal of the Climate. 1997. V. 10. No. 11. P. 2963–2978. https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<2963:SFVOTN>2.0.CO;2.

14. *Pookkandy B., Dommenget D., Klingaman N., Wales S., Chung C., Frauen C., Wolff H.* The role of local atmospheric forcing on the modulation of the ocean mixed layer depth in reanalysis and a coupled single column ocean model // Climate Dynamics. 2016. V. 47. No. 9. P. 2991–3010. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3009-7.

15. *Диансий Н.А.* Временные связи и пространственные формы совместных мод аномалий высоты изобарической поверхности 500 мб и температуры поверхности океана зимой в Северной Атлантике // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 2. С. 197–213.

16. *Кацман Ю.Я.* Теория вероятностей, математическая статистика и случайные процессы: учебник. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 131 с.

ANALYSIS OF THE SKEWNESS OF CHARACTERISTICS OF THE UPPER LAYER OF THE NORTH ATLANTIC ACCORDING TO THE ORA-S3 REANALYSIS

P.A. Sukhonos

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

The interannual anomalies of the upper mixed layer (UML) temperature and depth, the net surface heat flux and the wind stress modulus according to the ORA-S3 oceanic reanalysis data for the period 1980–2011 in a number of regions of the North Atlantic exhibit non-Gaussian variability. In the area south of the Azores, the distribution of anomalies of these characteristics has a significant positive skewness. The positive skewness of the UML temperature anomalies arises due to the positive skewness in the variability of the net surface heat flux and the UML depth, which are the components of the main UML heat balance term.

Keywords: non-Gaussianity, heat balance, upper mixed layer, North Atlantic.

REFERENCES

1. *Pires C.A.L. and Hannachi A.* Independent subspace analysis of the sea surface temperature variability: non-gaussian sources and sensitivity to sampling and dimensionality. *Complexity*, 2017, Vol. 2017, Article ID 3076810. https://doi.org/10.1155/2017/3076810.

2. *Sura P., Newman M. and Alexander M.A.* Daily to decadal sea surface temperature variability driven by state-dependent stochastic heat fluxes. *Journal of Physical Oceanography*, 2006, Vol. 36, No. 10, pp. 1940–1958. https://doi.org/10.1175/JPO2948.1.

3. *Sura P. and Sardeshmukh P.D. A global* view of non-Gaussian SST variability. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, Vol. 38, No. 3, pp. 639–647. https://doi.org/10.1175/2007JPO3761.1.

4. *Sura P.* On non-Gaussian SST variability in the Gulf Stream and other strong currents. *Ocean Dynamics*, 2010, Vol. 60, No. 1, pp. 155–170. https://doi.org/10.1007/s10236-009-0255-9.

5. *Sura P. and Sardeshmukh P.D.* A global view of air–sea thermal coupling and related non-Gaussian SST variability. *Atmospheric Research*, 2009, Vol. 94, No. 1, pp. 140–149. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.08.008.

6. *Sukhonos P.A. and Evstigneev V.P.* Analysis of the non-Gaussianity of the sea surface temperature in the North Atlantic based on reanalysis data. *Processes in GeoMedia*, 2022, Vol. 6. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16575-7_57.

7. *Balmaseda M.A., Vidard A., and Anderson D.L.T.* The ECMWF Ocean Analysis System: ORA-S3. *Monthly Weather Review*, 2008, Vol. 136, No. 8, pp. 3018–3034. https://doi.org/10.1175/2008MWR2433.1.

8. *Uppala S.M., KÅllberg P.W., Simmons A.J., et al.* The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, Vol. 131, No. 612, pp. 2961–3012. https://doi.org/10.1256/qj.04.176.

9. *Brooks C.E.P. and Carruthers N.* Handbook of Statistical Methods in Meteorology, London: Her Majesty's Stationery Office, 1953, 412 p.

10. *Kraus E.B.* Modeling and prediction of the upper layers of the ocean, Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, pp. 175–208.

11. *Wolff J.-O., Maier-Reimer E., and Legutke S.* The ocean primitive equation model. Tech. Rep. No. 13, Hamburg: German Climate Computer Center (DKRZ), 1997, 98 p.

12. *Polonsky A.B. and Sukhonos P.A.* O vklade vihrevogo perenosa v srednegodovoj byudzhet tepla verhnego sloya Severnoj Atlantiki (On the contribution of the eddy transport to the annual mean heat budget of the upper layer in the North Atlantic). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, No. 5, pp. 507–514. https://doi.org/10.1134/S0001433818050092.

13. *Alexander M.A. and Scott J.D.* Surface flux variability over the North Pacific and North Atlantic Oceans. *Journal of the Climate*, 1997, Vol. 10, No. 11, pp. 2963–2978. https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<2963:SFVOTN>2.0.CO;2.

14. *Pookkandy B., Dommenget D., Klingaman N., Wales S., Chung C., Frauen C., and Wolff H.* The role of local atmospheric forcing on the modulation of the ocean mixed layer depth in reanalysis and a coupled single column ocean model. *Climate Dynamics*, 2016, Vol. 47, No. 9, pp. 2991–3010. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3009-7.

15. *Dianskii N.A.* Vremennye svyazi i prostranstvennye formy sovmestnyh mod anomalij vy-soty izobaricheskoj poverhnosti 500 mb i temperatury poverhnosti okeana zimoj v Severnoj Atlantike (Spatio-temporal patterns between the coupled modes of 500-mb geopotential height and sea surface temperature anomalies in the wintertime North Atlantic). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 1998, Vol. 34, No. 2, pp. 197–213.

16. *Katsman Yu.Ya.* Teoriya veroyatnostey, matematicheskaya statistika i sluchaynyye protsessy (Probability theory, mathematical statistics and stochastic processes). Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2013, 131 p.

УДК 551.465.553 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-25-30

ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ 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. Для экспериментов были выбраны три основных локализации ветровой нагрузки: у западного берега, в центральной части расчетной области и у восточного берега. В работе проанализированы особенности разрушения струйного течения у западного берега в зависимости от локализации ветровой нагрузки.

Ключевые слова: синоптическая изменчивость, струйные течения, ветровые течения.

Поступила в редакцию 21.09.2022.

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 исследован процесс разрушения 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

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

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

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

где индекс j указывает номер слоя численной модели и изменяется от 1 до 2, 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 $\delta_{ji} = 1$ при $i = j$, D_j – диссипация, W_j – поток завихренности, генерируемой ветром, F_j – параметры стратифи-

кации 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 12000 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 $\beta = 1$, шаг по времени был равен 0,05 безразмерной единицы. Расчеты выполнены для параметров придонного трения λ_2= 0,035 и интенсивности потока ветровой завихренности $W_0 = 0{,}002$.

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 $4{,}9 \cdot 10^{-10}$.

В качестве начального поля для серии экспериментов было выбрано поле течений со сформированным струйным течением в окружении интенсивного поля вихрей, рис. 1, номера экспериментов указаны в подписях к рисункам.

В 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.

Ниже на рис. 3 представлено поле относительной завихренности для верхнего слоя при прогностическом расчете системы течений на 12000 суток с пространственнным распределением ветровой нагрузки № 1, рис. 2.

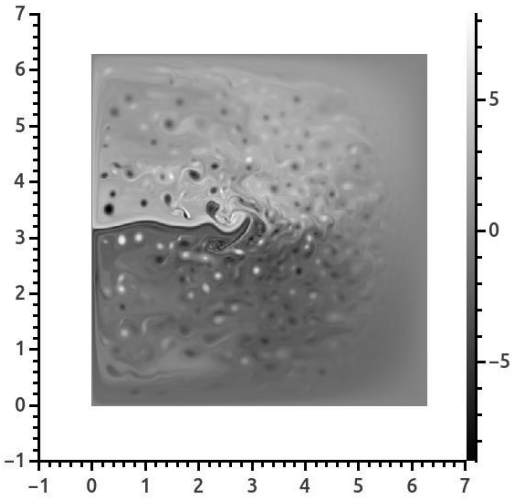


Рис. 1. Начальное поле завихренности верхнего слоя
Fig. 1. Initial vorticity field of upper layer

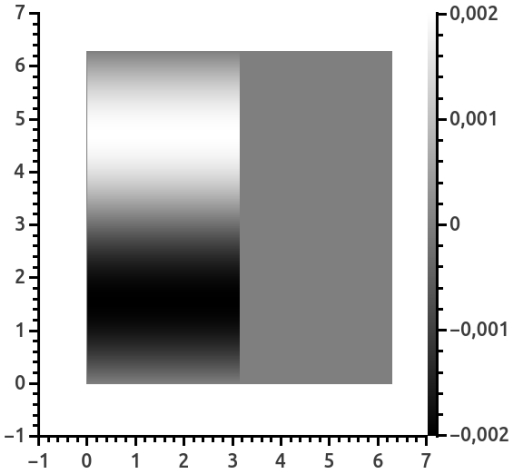


Рис. 2. Структура поля ветровой нагрузки № 1
Fig. 2. Wind stress field № 1

Последующие эксперименты выполнялись последовательно с локализацией воздействия ветра в, центральной № 2 и восточной № 3 частях расчетной области.

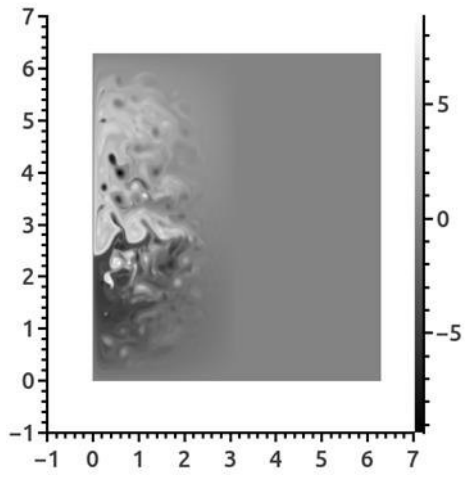


Рис. 3. Поле завихренности верхнего слоя № 1
Fig. 3. Vorticity field of upper layer № 1

На рис. 4 представлено поле ветра и на рис. 5 представлено поле относительной завихренности верхнего слоя при численном расчете на 12000 суток, расчет № 2.

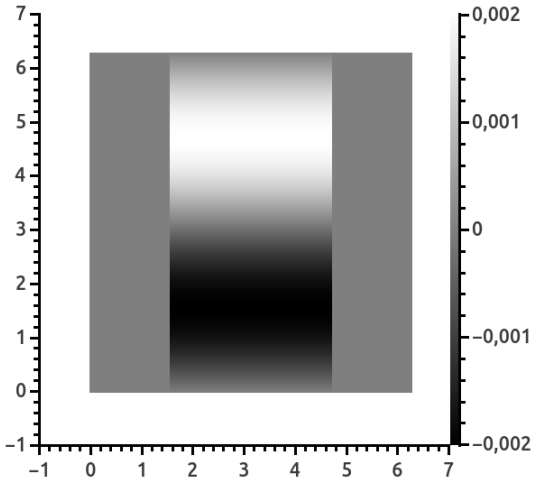


Рис. 4. Структура поля ветровой нагрузки № 2
Fig. 4. Wind stress field № 2

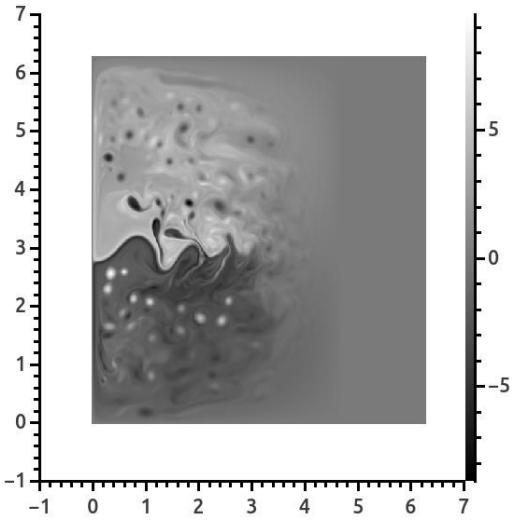


Рис. 5. Поле завихренности верхнего слоя № 2
Fig. 5. Vorticity field of upper layer № 2

На рис. 6 и 7 представлены соответственно поле ветровой нагрузки и поле относительной завихренности верхнего слоя при численном расчете на 12000 суток, расчет № 3.

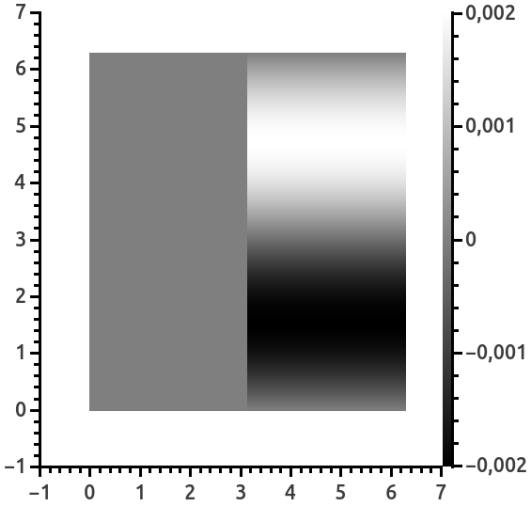


Рис. 6. Структура поля ветровой нагрузки № 3
Fig. 6. Wind stress field № 3

Сравнение полей на рис. 3 и рис. 5 демонстрирует отсутствие интенсивных значений поля завихренности к востоку от области ветрового воздействия, на рис.5 и рис. 7 отчетливо видно формирование протяженность того же прядка, но сама струя демонстрирует крупные меандры.

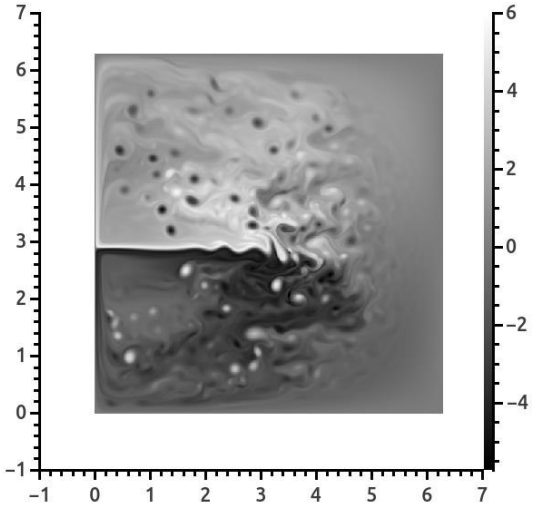


Рис. 7. Поле завихренности верхнего слоя № 3
Fig. 7. Vorticity field of upper layer № 3

На рис. 8 представлен временной ход кинетической энергии верхнего слоя для всех трех вышеописанных экспериментов.

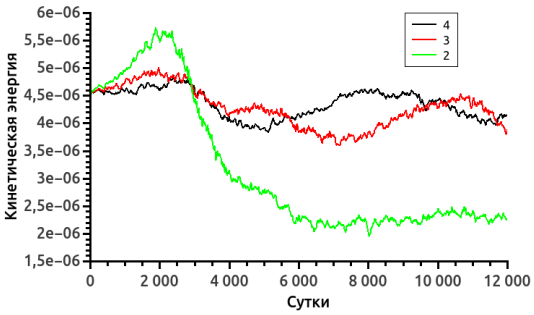


Рис. 8. Временной ход кинетической энергии, 2 — ветровая нагрузка №1 (запад), 3 — №2 (центр) и 4 - №3 (восток)
Fig. 8. Time course of kinetic energy, 2 - wind stress field № 1 (west), 3 - №2 (center) and 4 - №3 (east)

Хорошо видно, что для численных экспериментов № 2 и № 3, когда наблюдается наличие интенсивного струйного течения, кинетическая энергия верхнего слоя поддерживается на относительно высоком уровне, сравнимом с энергией начального поля. Эксперимент № 1 с западной локализацией ветровой нагрузки показывает разрушение интенсивной струи с одновременным падением уровня кинетической энергии приблизительно за 6000 суток с выходом значений кинетической энергии на уровень 50% от начального.

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 процесс разрушения 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 процесс разрушения интенсивного струйного течения происходит при ветровом воздействии в западной части акватории, при центральной локализации ветра струйное течение формируется менее протяженным в зональном направлении по сравнению с начальным полем и заметно меандрирует, при этом разрушения струйного течения не произошло при ветровом воздействии в восточной части расчетной области.

Временные ходы кинетической энергии верхнего слоя для всех трех обсуждаемых экспериментов (рис. 8) показывают, что ветровое воздействие на океан в центральной и восточной части акватории поддерживают ранее сформированное струйное течение с сохранением уровня кинетической энергии всего верхнего слоя океана, что обеспечивает интенсивный перенос энергии и импульса из западной части океана в его центральную и восточную часть. Напротив, ветровое воздействие на струйное течение, локализованное в западной части акватории, там, где собственно и происходит формирование интенсивной струи, разрушает само струйное течение, энергия верхнего слоя существенно падает и сосредотачивается в поле интенсивных вихрей, образующихся вблизи западного берега океана, что в свою очередь препятствует выносу энергии и импульса в центральную и восточную части океана. 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.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shevchenko I., Berloff P.* 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.

DIAGNOSTICS OF THE DESTRUCTION 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 three main wind action localization: near the western shore, in the central part of the settlement area and near the eastern shore. The paper analyzes the features of the destruction 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 I and Berloff P.* 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 574.24 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-31-39

РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ДВИЖЕНИЯ СТВОРОК ЧЕРНОМОРСКОЙ МИДИИ *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* LAM. В УСЛОВИЯХ ПИЩЕВОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ

И.И. Казанкова, С.В. Казанцев

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

Экспериментально исследованы особенности движения створок черноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* на ранних стадиях голодания. Определено, что при пищевой недостаточности, но благоприятных других условиях среднесуточное раскрытие створок в ходе эксперимента уменьшается, в основном, за счет увеличения длительности закрытого состояния моллюсков и уменьшения времени нахождения при уровне раскрытия створок более 50%. Изменение суточной ритмики движения створок в значительной степени было связано с режимом смены воды. Рассмотрена возможность сходства процессов, лежащих в основе изменений движения створок мидий как при недостаточности пищи, так и при загрязнении среды.

Ключевые слова: вальвометрия, раскрытие створок, уровень раскрытия створок, суточный ритм, пищевая недостаточность, контроль водной среды, Черное море.

Поступила в редакцию: 25.10.2022. После доработки: 08.12.2022.

Введение. Исследования движений створок моллюсков под воздействием факторов среды начались еще в 20 веке, в том числе и отечественными учеными (например, [1]). Значительный интерес к поведенческим реакциям моллюсков был вызван возможностью их использования для контроля и мониторинга качества водной среды, так как было определено, что под воздействием неблагоприятных факторов среды увеличивается время нахождения раковины в закрытом состоянии и уменьшается раскрытие створок моллюсков (например, [2, 3]).

Недостаточность пищи, как фактор среды, также вызывает у двустворчатых моллюсков изменение в движении их створок. Например, в лабораторных условиях мидии закрывали раковины при концентрации хлорофилла *a* ниже 0,5 мкг/л [4]. Некормленые ювенильные устрицы находились в закрытом состоянии почти 35% суточного времени, при непрерывной подаче пищи – 4% [5]. При постоянном кормлении моллюсков доля закрытых особей в течение суток не изменялась на всем протяжении опыта, но при низкой концентрации водорослей у моллюсков возникал циркадный ритм, и доля закрытых особей постепенно увеличивалась [2, 5].

В последнее время появилась возможность эффективно следить за движением створок различных видов моллюсков непосредственно в природных условиях на основе высокочастотной неинвазийной вальвометрии (ВНВ) (high-frequency noninvasive valvometry (HFNI) – по терминологии, предложенной в [6]). Начало этому методу, согласно [7], было положено благодаря применению электронных регистраторов движения створок Bivalvia [5].

Эксперимент с использованием метода ВНВ, проведенный в прибрежных водах Галиссии, показал, что *Mytilus galloprovincialis* при концентрации хлорофилла *a* 1–8 мкг/л проводят в закрытом состоянии только 2% времени при относительно постоянном среднесуточном раскрытии створок [8]. Те же значения демонстрировали особи *M. galloprovincialis* у берегов Крыма в относительно чистых водах [3]. В то время как в акваториях с хроническим загрязнением воды продолжительность закрытия створок постепенно увеличивалась, и уменьшалась величина их раскрытия [3].

Для Черного моря изучение поведенческих реакций моллюсков в условиях недостаточности пищи актуально, так как в последнее время на фоне климатических изменений увеличилась вероятность понижения продуктивности верхнего слоя черноморской пелагиали. Спутниковые измерения показали, что здесь наблюдаются длительные сезонные периоды пониженной концентрации хлорофилла *a* (менее 0,5 мг/м^3) [9]. Учет особенностей поведения черноморской мидии при недостатке пищи важен не только для более точной оценки результатов мониторинга морской среды, но и для моделирования продуктивности масштабных марихозяйств, а также для планирования экспериментов с мидиями и интерпретации их результатов.

Цель нашей работы – изучить изменения движения створок черноморской мидии в ходе многосуточного голодания, вызванного недостаточностью пищи, используя метод ВНВ; а также актуализировать учет этих изменений в мониторинговых исследованиях.

Материал и методы. *Условия эксперимента*. Моллюски для исследований были отобраны из обрастаний искусственных субстратов в прибрежной зоне. Было проведено три многодневных лабораторных эксперимента, обозначенных как *A, B* и *C*. Эксперимент *A* – с мидиями длиной 49–56 мм (октябрь 2016 г.), *B* – 35–41 мм (февраль – март 2018 г.) и *C* – 24–26 мм (май 2018 г.). Длительность экспериментов соответственно составила 13, 21 и 18 суток. Температура воды была комнатной: в эксперименте *A* она достигала 16,5–20,5, *B* – 10–13, *C* – 19–21 °С. В каждом опыте участвовало по 16 мидий. Перед началом эксперимента очищенных и измеренных моллюсков содержали в 20-литровой емкости с аэрируемой морской водой в течение суток. На следующий день с помощью клея "Эмоксипол" их прикрепляли к сенсорной части измерительного комплекса "Биомонитор-Л" [10]. Его особенностью является разделение электронного блока регистрации и сенсорной части, состоящей из датчика температуры и 16 биодатчиков. При определении раскрытия створок измеритель по величине магнитного поля регистрирует расстояние между магнитом, расположенным возле сифонального края раковины, и датчиком Холла. Эта величина пропорциональна раскрытию створок, которое измеряли с частотой раз в секунду с погрешностью 0,1 мм. После закрепления моллюсков на сенсорных панелях их помещали в четыре 4-литровых сосуда с аэрируемой водой по четыре экземпляра в каждый из них. Для содержания моллюсков использовали нефильтрованную природную воду, которую в течение экспериментов меняли несколько раз. Длительность этой процедуры составляла 1–2 мин. При смене воды микрообрастание, развивающееся на стенках сосудов и поверхности прибора, не удаляли. Изменение освещенности в лаборатории соответствовало ее естественному суточному ходу с максимальным значением, не превышающим 50 лк.

Недостаток пищи в эксперименте обеспечивался небольшим объемом приходящейся на особь воды и режимом ее смены. Со свежей водой мидии получали порцию природного фитопланктона. Если исходить из наибольшего значения его биомассы в прибрежных водах Черного моря, достигающей около 2 мг/л [11], и калорийности фитопланктона, составляющей в среднем 250 кал/г [12], то свежая порция фитопланктона, содержащаяся в 16 л воды, максимально будет содержать всего около 8 калорий. Для мидии длиной 24–26 мм, сухой вес мягких тканей которой составляет около 50 мг [13], суточный рацион при 19–21°С достигает около 12 калорий [14]. Для 16 таких особей соответственно – около 200 калорий. То есть мидии в эксперименте, несомненно, испытывали голод.

По техническим причинам на пятые сутки эксперимента *A* и во второй половине эксперимента *C* аэрация не осуществлялась.

Получение данных и их обработка. С помощью программного обеспечения "Биомонитора-Л" было произведено сглаживание выводимых на экран данных данных и конвертирование их в

программу Excel для дальнейшей их статистической обработки.

Весь массив данных разбивался по суткам и часам. Значения раскрытия створок были приведены к нулю, за который принималось наименьшее значение их раскрытия за сутки.

Кроме раскрытия створок мидий определяли уровень их раскрытия (УРС) и время нахождения моллюсков при различных УРС. Стопроцентный УРС каждой мидии соответствовал максимальному раскрытию их створок за весь период наблюдения. Данный параметр позволяет нивелировать индивидуальные различия участвующих в эксперименте моллюсков по величине максимального раскрытия их створок, которое зависит от индивидуальных характеристик мидий и особенностей их прикрепления к сенсорной части прибора.

С помощью программного обеспечения "Биомонитора-Л" определяли также скользящее среднее створочной активности моллюсков, выраженное в процентах относительно его максимального значения за весь период исследования. Исходя из формулы [15], створочная активность моллюска есть сумма перемещений, осуществляемых краем створки мидии за единицу времени. Данная величина зависит от количества движений «раскрытие-закрытие» в единицу времени и их амплитуды. Доверительные интервалы средних вычисляли при $\alpha = 0{,}05$.

Результаты. *Время нахождения мидий в закрытом состоянии.* (В данном анализе закрытым состоянием створок условно считалось их раскрытие в диапазоне от 0 до 0,5 мм). В ходе всех трех экспериментов среднее за сутки время нахождения мидий в закрытом состоянии постепенно увеличивалось от 2–10 до 40% (рис. 1). Окончанием эксперимента *C* считали 10-е сутки, так как далее отсутствовала аэрация. Отключение аэрации в эксперименте *A* в течение пятых суток и в эксперименте *C* после десятых суток резко увеличивало время закрытого состояния моллюсков.

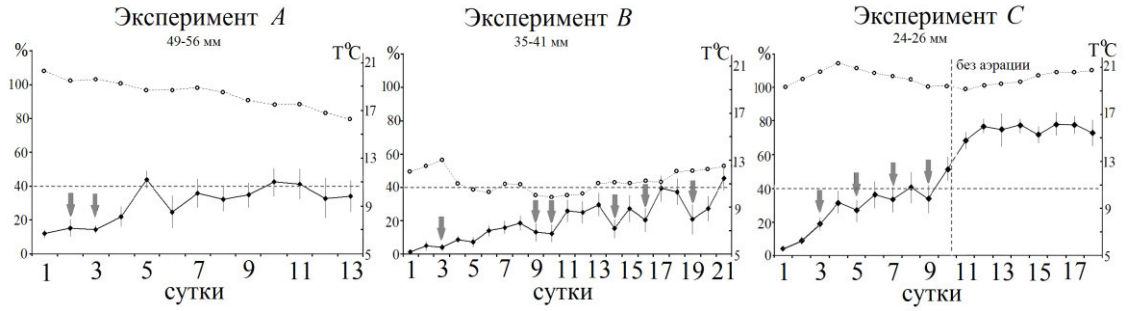


Рис. 1. Среднее для 16 мидий время нахождения в закрытом состоянии с доверительными интервалами. Белые кружки – средняя температура воды. Стрелками указаны дни смены воды
Fig. 1. Mean time in the closed state 16 mussels with confidence intervals. White circles are the average water temperature. The arrows indicate the days of the water change

В эксперименте *B* отмечалось почти двукратное, по сравнению с экспериментами *A* и *C,* увеличение количества дней, в течение которых достигалась сорокапроцентная длительность нахождения моллюсков в закрытом состоянии. Это могло быть связано с пониженной температурой воды в этом эксперименте, которая была на 10°C меньше, чем в экспериментах *A* и *C*.

Дальнейшие расчеты проводили по результатам эксперимента *C*. В этом опыте смена воды проводилась более регулярно, что могло уменьшить накопление в воде продуктов метаболизма моллюсков. Как показали дополнительные исследования в экспериментах с мидиями длиной 24–26 мм, проводимых в тех же условиях, что и в эксперименте *C,* концентрация токсичных ионов мине-

рального азота была значительно ниже предельно допустимой [13]. Кроме того, особи длиной 24–26 мм, как правило, неполовозрелы или находятся в самом начале полового созревания, что исключает их нерест в экспериментальных сосудах и, возможно, позволяет получить статистически более однородные результаты.

Время нахождения мидий при различных УРС. На диаграмме (рис. 2) представлено время нахождения мидий при различных УРС в начале (1–2 сутки), середине (5–6 сутки) и конце эксперимента (9–10 сутки). К концу эксперимента длительность закрытого состояния моллюсков при УРС = 0–10% возросла от 5 до 40% (рис 2а). Соответственно, уменьшилось время нахождения моллюсков при остальных УРС.

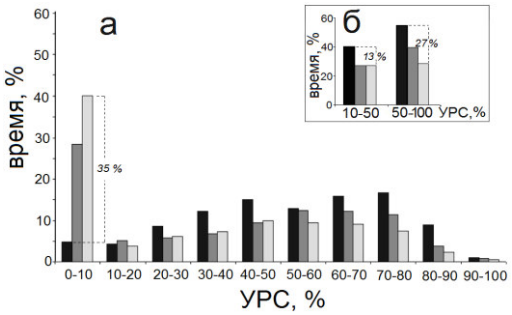


Рис. 2. Время нахождения мидий при различном УРС в начале, середине и конце эксперимента – черные, темно-серые и светло-серые столбики соответственно

Fig. 2. The residence time of mussels at different levels of valve opening at the beginning, middle and end of the experiment – black, dark gray and light gray bars, respectively

Суммирование показало, что в конце эксперимента длительность нахождение раковины при УРС 50–100% сократилась более, чем в два раза, в то время как при УРС 10–50% – в полтора раза (рис. 2б). Начальное время нахождения мидий при максимальном раскрытии створок (УРС=90–100%) составило 1%, в конце эксперимента оно уменьшилось до 0,5% (рис. 2а).

Среднее и максимальное раскрытие створок. К концу эксперимента среднее раскрытие мидий уменьшилось почти в два раза – от двух до одного миллиметра (рис. 3). Это уменьшение не было связано с температурой, которая, начиная с четвертого дня, снизилась с 21°С до более благоприятных для черноморской мидии значений – 19°С. В то же время среднее максимальное раскрытие створок 16 мидий в течение эксперимента значимо не изменялось и составляло около 3 мм.

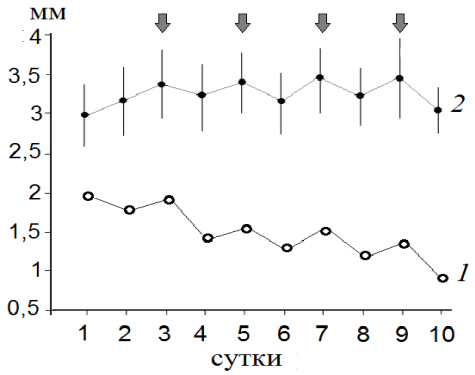


Рис. 3. Раскрытие створок в ходе эксперимента: 1 – среднее раскрытие (n≫100000, std = 0.80–1.27 мм), 2 – максимальное раскрытие (n=16, std = 0,81–1,06 мм)

Fig. 3. Average daily opening of mussel valves during the experiment: 1 – average opening (n≫100000, std = 0.80–1.27 mm), 2 – maximum opening (n=16, std = 0,81–1,06 mm)

Движение створок мидий в зависимости от времени суток. Данные по величине раскрытия створок мидий в каждые из суток были разбиты на четыре шестичасовых периода: 0–6, 6–12, 12–18 и 18–24 ч (рис. 4). Посуточное представление раскрытия створок в каждый 6-часовой период показало незначительное различие параметра в первых трех из них. В период с 18 до 24 ч среднее раскрытие створок изменялось скачкообразно, что было связано со сменой воды, проводившейся в вечернее время через день. На следующие сутки после смены воды раскрытие створок резко уменьшалось и приближалось к значениям других 6-часовых периодов.

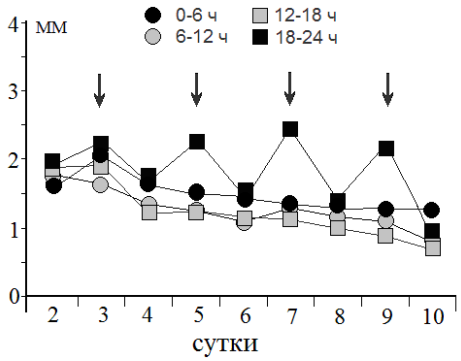


Рис. 4. Среднее раскрытие створок за шестичасовые периоды. Стрелками указаны дни смены воды
Fig. 4. Mean daily opening of the mollusk valves over six-hour periods. The arrows indicate the days of water change

Створочная активность мидий в ходе эксперимента. Более подробно изменение в движении створок мидий в ходе эксперимента в зависимости от времени суток и в связи со сменой воды отражает график скользящей средней створочной активности.

Как видно из рис. 5, мидии совершали движение створками на протяжении всего эксперимента, постепенно уменьшая створочную активность к его концу. Это выражалось в уменьшении амплитуды ежесуточных пиков активности и их длительности. В первые сутки наблюдался как дневной (через полтора часа после начала эксперимента), так и ночной пик активности, проходивший около полуночи. Через сутки дневной пик повторился в ослабленном виде, и далее он практически исчез. Первая смена воды была проведена на третий день. В эти сутки и далее ночной пик проходил на 2–3 ч раньше, чем в начале эксперимента. В дальнейшем в ходе эксперимента после смены воды движение створок мидий в вечерне-ночной период было заметно активнее, чем в предыдущие и последующие сутки.

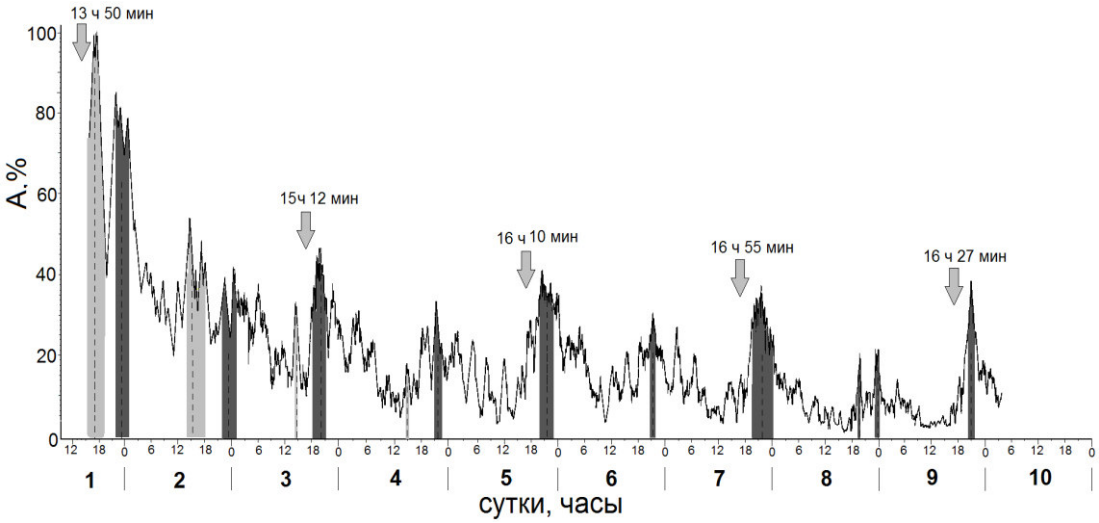


Рис. 5. Скользящее среднее створочной активности мидий (А) за суточные периоды с шагом в 1 с. За 100% принята максимальная величина А. Вертикальные светлые и темные полосы – дневные и ночные пики соответственно. Стрелками указаны моменты смены воды
Fig. 5. Moving average of mussel valve activity (A) for daily periods with a step of 1 s. The maximum value of A was taken as 100%. The vertical light and dark bands are the day and night peaks, respectively. The arrows indicate the moments of water change

Обсуждение. *Сходство в движении створок при пищевой недостаточности и загрязнении среды.* В основе этого сходства, выражающегося в уменьшении раскрытия створок и увеличении времени нахождения в закрытом состоянии, могут лежать одни и те же адаптивные процессы, суть которых заключается в уменьшении фильтрационной активности моллюсков из-за уменьшения раскрытия створок [16]. То есть первично – уменьшение раскрытия створок в ответ

на воздействие факторов среды, вторично – уменьшение скорости фильтрации. Это приводит к сокращению потребления кислорода и позволяет моллюскам экономить расход энергетических субстратов и дольше не переходить на энергетически менее эффективное анаэробное дыхание, при котором на молекулу глюкозы (полученную в результате гидролиза запасенного в тканях гликогена) приходится выход только двух молекул АТФ, тогда как аэробный путь дает 36 АТФ [17]. Показано, что в лабораторных и полевых экспериментах у голодающих мидий потеря веса в течение разных сроков была меньше в 7–12 раз, по сравнению с расчетной потерей веса активно фильтрующих голодающих мидий с постоянно открытыми створками [18].

То есть уменьшение среднесуточного раскрытия раковины моллюска и увеличение времени нахождения в закрытом состоянии при голодании и загрязнении, по всей видимости, необходимо моллюску для экономии своих энергетических ресурсов. Сохранение среднего максимального раскрытия мидий на протяжении всего десятисуточного эксперимента, возможно, является необходимым для мидий поведенческим элементом.

Что касается створочной активности, то обращает внимание её увеличение у моллюсков как при получении ими пищи, на фоне ее отсутствия в предшествующий период (см. рис. 5), так и при попадании в воду токсикантов [19]. В последнем случае рост створочной активности происходит за счет увеличения частоты движений створок, несмотря на уменьшение их амплитуды.

Суточная ритмика при пищевой недостаточности. Как было отмечено выше, в экспериментах при постоянной высокой концентрации в воде клеток водорослей у моллюсков отсутствует циркадная ритмика в движении створок, но она возникает при недостаточности пищи [2]. При этом у мидий в естественных условиях или в экспериментах, приближенных к естественным условиям, наблюдается ночной пик активности [2, 3, 20], что увязывают с динамикой изменения освещенности или уменьшением активности зрительно ориентирующихся хищников.

В нашем эксперименте некоторое повышение створочной активности в ночной период могло быть связано с суточными изменениями освещенности от 0 до 50 лк. Исчезновение через двое суток после начала эксперимента дневных пиков активности мидий, сохранение ночного пика со сдвигом на два часа раньше, относительно времени его прохождения в первые сутки (см. рис. 4), можно объяснить в первом случае «забыванием», а во втором – «запоминанием» мидиями времени получения пищи во время смены воды. Это предположение основывается на результатах экспериментов, описанных в [21], которые позволили авторам сделать вывод о возможной способности мидий «помнить» и «забывать» время, в которое ранее происходило поступление пищи. Причем, у голодных мидий процесс «забывания» идет медленнее, чем у сытых.

То есть возможной причиной ночного пика активности мидий в природе может быть, в том числе, и улучшение условий питания ночью, относительно дневного периода.

Вальвометрия в мониторинге прибрежной экосистемы. Выявление изменений в движении створок мидий при пищевой недостаточности методом ВНВ может быть элементом контроля продукционных возможностей среды и состояния популяции мидии. Для Черного моря это достаточно актуально в связи с существенной деградацией в последние десятилетия мидийных поселений, одной из причин которой может быть ухудшение условий для роста моллюсков. При этом происходит снижение репродукционного потенциала популяции, в том числе и за счет изменения ее половой структуры в сторону увеличения доли самцов, так как на производство яйцеклеток моллюски тратят больше энергии, чем на выработку сперматозоидов [22]. Загрязнение среды при этом может играть второстепенную роль.

Заключение. Определено, что при пищевой недостаточности постепенное уменьшение среднесуточного раскрытия створок мидий происходит, в основном, за счет увеличения суммарного времени

нахождения их в закрытом состоянии и уменьшении времени нахождения моллюсков при УРС более 50%. Среднее максимальное раскрытие створок в течение эксперимента значимо не изменялось. Время прохождения пиков створочной активности и его изменение в ходе эксперимента может свидетельствовать в пользу способности моллюсков к «запоминанию» и «забыванию» моментов получения пищи. В целом, основные закономерности изменения движения створок мидий в условиях пищевой недостаточности и при загрязнении среды совпадают, что необходимо учитывать при мониторинге среды. В связи с сезонной, межгодовой и междесятилетней, а также пространственной изменчивостью параметров среды в Черном море мониторинг признаков голодания черноморской мидии методом ВНВ является возможным и перспективным элементом комплексного мониторинга прибрежных экосистем.

Авторы благодарят Гайского П.В. и Шлыка А.В. за техническое обеспечение экспериментов. Работа выполнена в рамках государственных задания ИПТС (№ госрегистрации 121122300072-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карпенко А.А., Тюрин А.Н., Морозов А.В.* Влияние сублетальных воздействий некоторых факторов среды на двигательную активность двустворчатых моллюсков и возможность использования их для биологического мониторинга водной среды // Прикладная этология: Мат. III Всес. конф. по поведению животных. М.: Наука, 1983. Т. 3. С. 144–146.

2. *Borcherding J.* Another early warning system for the detection of toxic discharges in the aquatic environment based on valve movements of the freshwater mussel *Dreissena polymorpha //* In Limnology ectuell. «The zebra mussel *Dreissena polymorpha* – Ecology, biological monitoring and first applications in the water quality management». D. Neumann and H. Jenner (eds.). 1992. V. 4. P. 127–146.

3. *Трусевич В.В., Гайский П.В., Кузьмин К.А. и др.* Биомаркеры поведенческих реакций черноморской мидии для автоматизированного биомониторинга экологического состояния водной среды // Системы контроля окружающей среды. 2015. № 1 (21). С. 13–18.

4. *Maier O., Amouroux J.M., Duchene J.C. et al.* Relationship between filtration activity and food availability in the Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis* // Mar. Biol. 2007. 152: 1293–1307.

5. *Higgins P.J.* Effects of food availability on the valve movements and feeding behaviour of juvenile *Crassostrea virginica* (Gmelin). I. Valve movements and periodic activity // J. Exp, Mar. Biol. Ecol. 1980. V. 45. P. 229–244.

6. *Schwartzmann C., Durrieu G., Sow M. et al.* In situ giant clam growth rate behavior inrelation to temperature: a one-year coupled study of high-frequency noninvasive valvometry and sclerochronology // Limnol. Oceanogr. 2011. V. 56. P. 1940–1951.

7. *Clements J.C., Comeau L.A.* Use of high-frequency, noninvasive electromagnetic biosensors to detect ocean acidification effects on shellfish behaviour // J. of Shellfish Research. 2019. 38 (3): 811–818.

8. *Comeau L.A., Babarro J.M.F., Longa A. et al.* Valve-gaping behavior of raft-cultivated mussels in the Ría de Arousa, Spain // Aquaculture Reports. 2018. V. 9. P. 68–73.

9. *Финенко З.З., Мансурова И.М., Суслин В.В.* Динамика концентрации хлорофилла *a* в Черном море по спутниковым измерениям // Морск. биологический журнал. 2019. Т. 4, № 2. С. 87–95.

10. *Гайский П.В.* Устройство для измерения двигательной активности створок моллюсков. Патент UA № 106661. 2014.

11. *Ясакова О.Н.* Сезонная динамика фитопланктона Новороссийской бухты в 2007 г. // Морской экологический журнал. 2013. Т. 12, № 1. С. 92–102.

12. *Бергер В.Я.* Продукционный потенциал Белого моря. Исследования фауны морей. Т. 60 (68). СПб: ЗИН РАН, 2007. 292 с.

13. *Казанкова И.И., Байрит М.М.* Контроль концентрации минерального азота как возможного фактора влияния на результаты вальвометрии мидий, со-

держащихся в непроточных условиях при недостатке пищи // Системы контроля окружающей среды. Севастополь. 2021. № 2 (44). С. 81–87.

14. *Печень-Финенко Г.А.* Скорость фильтрации воды *Mytilus galloprovincialis* Lam. как функция массы тела и температуры // Экология моря. 1987. Т. 25. С. 54–62.

15. *Гайский П.В., Казанкова И.И.* Программный алгоритм расчета активности двустворчатых моллюсков на примере перловицы *Unio crassus //* Системы контроля окружающей среды. 2016. № 6 (26). С. 52–58.

16. *Jørgensen C.B., Larsen P.S., Møhlenberg F. et al.* The bivalve pump: properties and modelling // Marine Ecology Progress Series. 1988. V. 45. P. 205–216.

17. *De Zwann A., Mathieu M.* Cellular biochemistry and endocrinology // The mussel *Mytilus*: ecology, physiology, genetics and culture (E.M. Gosling, ed.). Amsterdam; New York: Elsevier, 1992. P. 223–307.

18. *Riisgård H.U., Larsen P.S.* Physiologically regulated valve-closure makes mussels long-term starvation survivors: test of hypothesis // Journal of Molluscan Studies. 2015. V. 81. P. 303–307.

19. *Гайский П.В.* Алгоритмически-программный анализ створочной активности моллюсков для обнаружения токсичных загрязнений водной среды // Экол. безопасн. прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 4. С. 81–94.

20. *Ameyaw-Akumfi C., Naylor E.* Temporal patterns of shell-gape in *Mytilus edulis* // Mar. Biol. 1987. V. 95, № 2. P. 237–242.

21. *Riisgård H.U., Lassen J., Kittner C.* Valve-gape response times in mussels (*Mytilus edulis*) – effects of laboratory preceding-feeding conditions and in situ tidally induced variation in phytoplankton biomass. *J. shellfish res*. 2006/ V. 25. pp. 901–913.

22. *Breton S., Capt C., Guerra D. et al.* Sex Determining Mechanisms // Sex Determining Mechanisms in Bivalves. In: Leonard J.L., Ed., Transitions between sexual systems: understanding the mechanisms of, and pathways between, dioecy, hermaphroditism and other sexual systems, 2018, pp. 165–192.

THE RESULTS OF MONITORING THE MOVEMENT OF THE VALVES OF THE BLACK SEA MUSSEL *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* LAM. IN CONDITIONS OF NUTRIENT DEFICIENCY

I.I. Kazankova, S.V. Kazantsev
Institute of Natural and Technical systems, Sevastopol, Russia

Through experiments conducted, movement features of the valves of the Black Sea mussel *Mytilus galloprovincialis* in the early stages of starvation are studied. It is revealed that during the experiment under conditions of nutrient deficiency, with other conditions being favorable, the average daily opening of the valves decreases, mainly due to an increase in the duration of the closed state of mollusks and a decrease in the time spent at a level of valve opening is more than 50%. The change in the daily rhythm of valve movement is largely dependent on the regime of water change. The possibility of similarity of the processes underlying the changes in the movement of mussel valves, both in case of nutrient deficiency and environmental pollution, is considered.

Key words: valvometry, opening of the valves, level of valve opening, diurnal rhythm, nutrient deficiency, control of aquatic environment, Black Sea.

REFERENCES

1. *Karpenko A.A., Tyurin A.N., and Morozov A.V.* Vliyanie subletal'nyh vozdejstvij nekotoryh faktorov sredy na dvigatel'nuyu aktivnost' dvustvorchatyh mollyuskov i vozmozhnost' ispol'zovaniya ih dlya biologicheskogo monitoringa vodnoj sredy (The use of sublethal effects of some environmental factors on the motor activity of bivalve molluscs and the possibility of using them for biological monitoring of the aquatic environment). Prikladnaya etologiya: Materialy III Vses. konf. po povedeniyu zhivotnyh, M.: Nauka, 1983, Vol. 3, pp. 144–146.

2. *Borcherding J.* Another early warning system for the detection of toxic discharges in the aquatic environment based on valve movements of the freshwater mussel *Dreissena polymorpha //* In: Neumann D. and Jenner H., Eds., Limnology ectuell. «The zebra mussel *Dreissena polymorpha* – Ecology, biological monitoring and first applications in the water quality management», 1992, Vol. 4, pp. 127–146.

3. *Trusevich V.V., Gajskij P.V., Kuz'min K.A., and Mishurov V.Zh.* Biomarkery povedencheskih reakcij chernomorskoj midii dlya avtomatizirovannogo biomonitoringa ekologicheskogo sostoyaniya vodnoj sredy (Biomarkers of behavioral reactions of Black Sea mussel for automated biomonitoring of the ecological state of the aquatic environment). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2015, No. 1(21), pp. 13–18.

4. *Maier O., Amouroux J.M., Duchene J.C., and Grémare A.* Relationship between filtration activity and food availability in the Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis*. *Mar. Biol.,* 2007, 152: 1293–1307.

5. *Higgins P.J.* Effects of food availability on the valve movements and feeding behaviour of juvenile *Crassosrea virginica* (Gmelin). I. Valve movements and periodic activity. *J. Exp, Mar. Biol. Ecol*., 1980, Vol. 45, pp. 229–244.

6. *Schwartzmann C., Durrieu G., Sow M., Ciret P., Claire E.L.,and Massabuau J.-C.* In situ giant clam growth rate behavior inrelation to temperature: a one-year coupled study of high-frequency noninvasive valvometry and sclerochronology // *Limnol. Oceanogr.,* 2011, Vol. 56, pp. 1940–1951.

7. *Clements J.C. and Comeau L.A.* Use of high-frequency, non-invasive electromagnetic biosensors to detect ocean acidification effects on shellfish behaviour. *J. of Shellfish Research*, 2019, No. 38 (3), pp. 811–818.

8. *Comeau L.A. and Babarro J.M.F., Longa A., and Padin X.A.* Valve-gaping behavior of raft-cultivated mussels in the Ría de Arousa, Spain. *Aquaculture Reports*, 2018, Vol. 9, pp. 68–73.

9. *Finenko Z.Z., Mansurova I.M., and Suslin V.V.* Dinamika koncentracii hlorofilla a v Chernom more po sputnikovym izmereniyam (Dynamics of chlorophyll a concentration in the Black Sea on satellite data). *Morskoj biologicheskij zhurnal,* 2019, Vol. 4, No. 2, pp. 87–95.

10. *Gajskij P.V.* Ustrojstvo dlya izmereniya dvigatel'noj aktivnosti stvorok mollyuskov (A device for measuring the motor activity of mollusk valves). Patent UA № 106661, 2014.

11. *Yasakova O.N.* Sezonnaya dinamika fitoplanktona Novorossijskoj buhty v 2007 g (The annual dynamics of the phytoplankton in the Novorossiysk Bay in 2007). *Morskoj ekologicheskij zhurnal,* 2013, Vol. 12, No.1, pp. 92–102.

12. *Berger V.Ya.* Produkcionnyj potencial Belogo morya. Issledovaniya fauny morej (Production potential of the White Sea. Researches of fauna of the seas). Vol. 60 (68), S.-Pb.: ZIN RAN, 2007, 292 p.

13. *Kazankova I.I. and Bajrit M.M.* Kontrol' koncentracii mineral'nogo azota kak vozmozhnogo faktora vliyaniya na rezul'taty val'vometrii midij, soderzhashchihsya v neprotochnyh usloviyah pri nedostatke pishchi (Monitoring of mineral nitrogen concentration as a possible factor of influence on the results of valvometry of mussel kept in non-flow conditions with food defenciency). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy,* 2021, No. 2 (44), pp. 81–87.

14. *Pechen'-Finenko G.A.* Skorost' fil'tracii vody *Mytilus galloprovincialis* Lam. kak funkciya massy tela i temperatury (The rate of water filtration in *Mytilus galloprovincialis* Lam. as a function of mass and temperature). *Ekologiya morya.* 1987, Vol. 25, pp. 54–62.

15. *Gajskij P.V. and Kazankova I.I.* Programmnyj algoritm rascheta aktivnosti dvustvorchatyh mollyuskov na primere perlovicy *Unio crassus* (Program algorithm of calculation of clams activity on the example of a thick shelled river mussel *Unio crassus*). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy,* 2016, No. 6 (26), pp. 52–58.

16. *Jørgensen C.B., Larsen P.S., Møhlenberg F., and Riisgård H.U.* The bivalve pump: properties and modelling. *Marine Ecology Progress Series,* 1988, Vol. 45, pp. 205–216.

17. *De Zwann A. and Mathieu M.* Cellular biochemistry and endocrinology. In: Gosling E.M., Ed., The mussel Mytilus: ecology, physiology, genetics and culture, Amsterdam; New York: Elsevier, 1992, pp. 223–307.

18. *Riisgård H.U. and Larsen P.S.* Physiologically regulated valve-closure makes mussels long-term starvation survivors: test of hypothesis. *Journal of Molluscan Studies,* 2015, Vol. 81, pp. 303–307.

19. *Gajskij P.V.* Algoritmicheski-programmnyj analiz stvorochnoj aktivnosti mollyuskov dlya obnaruzheniya toksichnyh zagryaznenij vodnoj sredy (Algorithm-program analysis of shellfish gape activity for toxic contaminant detection in aquatic environment). *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon morya.* 2021. No. 4. pp. 81–94.

20. *Ameyaw-Akumfi C. and Naylor E.* Temporal patterns of shell-gape in *Mytilus edulis. Mar. Biol.,* 1987, V. 95, No. 2, pp. 237–242.

21. *Riisgård H.U., Lassen J., and Kittner C.* Valve-gape response times in mussels (*Mytilus edulis*) – effects of laboratory preceding-feeding conditions and in situ tidally induced variation in phytoplankton biomass. *J. shellfish res*., 2006, Vol. 25, pp. 901–913.

22. *Breton S., Capt C., Guerra D., and Stewart D.* Sex Determining Mechanisms in Bivalves. In: Leonard J.L., Ed., Transitions between sexual systems: understanding the mechanisms of, and pathways between, dioecy, hermaphroditism and other sexual systems, 2018, pp. 165–192.

УДК 556.082 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-40-45

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ ПРИБОРА В МОРЕ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ

В.А. Гайский

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

Предлагается при зондировании вод измерять одновременно гидростатическое давление и локальную плотность воды и вычислять глубину погружения прибора как сумму отрезков расстояний, полученных из деления приращения давлений на произведение средней локальной плотности на отрезке между отсчетами давления и ускорения силы тяжести. Результат не зависит от скорости зондирования и отклонения от вертикали. Метод пригоден для определения отклонения движения подводного аппарата или буксируемого прибора от заданной глубины. За счет усреднения случайных погрешностей измерения и аддитивной случайной помехи может быть достигнута гарантированная точность порядка 10^{-4}.

Ключевые слова: глубина погружения, гидростатическое давление, локальная плотность.

Поступила в редакцию: 28.09.2022.

Введение. Известны способы определения глубины приборов в море по измерениям гидростатического давления. Например, достаточно подробный обзор этих способов приведен в работе [1]. Эти способы основаны на уравнении гидростатики, связывающим гидростатическое давление $P(z)$ на глубине z с профилем плотности $\rho(z)$ и значением ускорения силы тяжести $g(\varphi, z)$, зависящим в свою очередь от географической широты φ и глубины z, и имеющим вид

$$P(z) = P_a + \int_0^z g(\varphi, z)\,\rho(z)dz, \qquad (1)$$

где P_a – атмосферное давление, которое измеряют или принимают, причем в океанографии принимают $P_a = 0{,}101326$ МПа.

Поскольку профиль $\rho(z)$ априорно неизвестен, то принимают некоторые модели среды и устанавливают расчетные зависимости $P(z)$ или $z(P)$. При грубых определениях для неточных измерений используется формула [2]

$$z = 0{,}9919\,P - 0{,}2121\,P^2 \cdot 10^{-5} \quad [P \text{ в МПа}]\ . \qquad (2)$$

Если представить «стандартный» океан однородным слоем соленостью 35‰ и температурой 0ºС, то более точная формула будет иметь вид [3]

$$P = 0{,}101326 + 0{,}01008247\ z + 0{,}2334 \cdot 10^{-7}\, z^2 \qquad [P \text{ в МПа},\ z \text{ в м}]\ . \qquad (3)$$

При использовании модели «стандартного» океана и Международного уравнения состояния морской воды (1980 г.) с учетом зависимости $g(\varphi)$ более точная формула имеет вид [4]

$$z = \left[100 - \left(5{,}92 + 5{,}25 \sin^2\varphi\right) \cdot 10^{-1}\right] P - 2{,}21 \cdot 10^{-2} P^2 \quad [P \text{ в МПа},\ z \text{ в м}]\ . \qquad (4)$$

Эта формула дает погрешность порядка 0,4 м для глубин от 0 до 6000 м широт от 0 до 70^0. Однако для реального океана необходимо учитывать ре-

гиональные поправки от –1,5 м до 2,5 м для глубин до 1000 м и от 0 до 4 м для глубин до 6000 м [5].

Аналогичные выражения связи $z(P)$ и $P(z)$ для других моделей морской среды и вычислительных процедур приводятся в работах [6–10].

Имеется формула определения глубины приборов в некотором «стандартном» Черном море вида [11]

$$z = \left(1{,}00675014 - 9{,}215\cdot 10^{-5}\varphi\right)\cdot P + \left(-2{,}4057\cdot 10^{-6} + 2\cdot 10^{-10}\varphi\right)\cdot P^2 + 2{,}3\cdot 10^{-11}\cdot P^3$$

(z – в метрах, P – в децибарах) . (5)

Эта формула дает погрешность до 4–5 метров в «стандартном» Черном море на предельных глубинах.

С применением уравнения состояния морской воды TEOS-10 способ определения глубины погружения приборов по давлению принципиально не изменился, поскольку вновь традиционно используется новая модель «стандартного» океана и вводятся региональные поправки [12].

Таким образом, во всех перечисленных вариантах определения глубины погружения прибора используется один и тот же метод, содержащий измерение гидростатического давления и вычисление глубины по формуле, полученной из представления среды некоторой «стандартной» статической моделью из эмпирических данных о профиле плотности вод, при которых реальные профили температуры и электропроводности среды не учитываются.

Недостатком этого метода является декларативность заявляемой точности порядка 10^{-3}, которая не гарантируется при измерениях в реальной среде, являющейся нестационарной в пространстве и времени.

Целью работы является повышение гарантированной точности измерения глубины погружения прибора в водной среде с априорно неизвестными характеристиками.

Основная часть. При зондировании одновременно измеряем гидростатическое давление и локальную плотность воды. Считаем, что уже созданы рабочие средства измерения локальной плотности морской воды в среде [13]. Графики измеряемых и вычисляемых величин при зондировании вниз представлены на рис. 1.

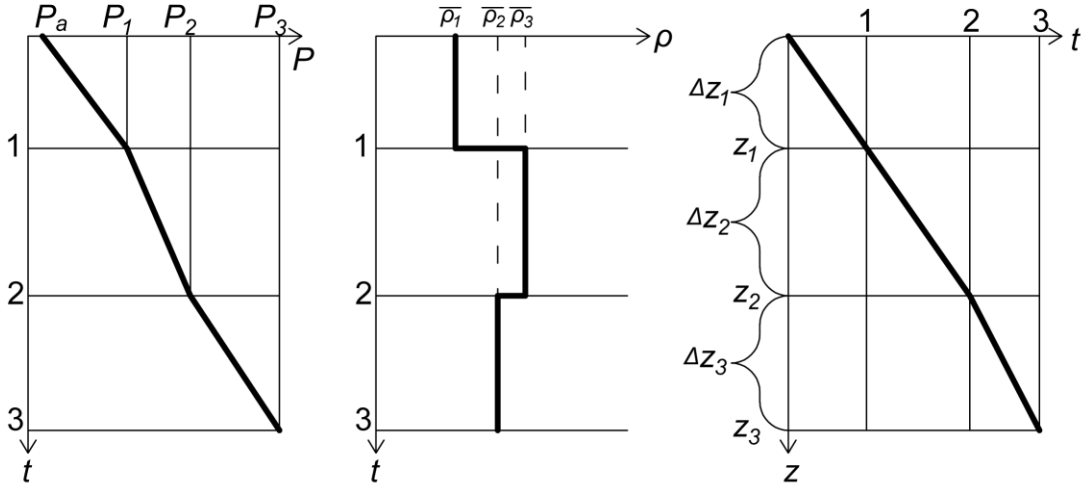
Общее обоснование способа состоит в следующем. Рассмотрим разность двух давлений P_2 и P_1 на двух последовательных горизонтах зондирования в соответствии с уравнением гидростатики (1)

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \int_0^{z_2} g(\varphi, z)\,\rho(z)dz - \int_0^{z_1} g(\varphi, z)\,\rho(z)dz \approx g(\varphi, z)\int_{z_1}^{z_2}\rho(z)dz = \\ = \overline{g}(\varphi, z)\left(z_2 - z_1\right)\overline{\rho}(z) = g(\varphi, z)\,\Delta z\,\overline{\rho}(z)\,. \quad (6)$$

Откуда

$$\Delta z = \frac{\Delta P}{g(\varphi, z)\,\overline{\rho}(z)}\,, \quad (7)$$

где Δz – перемещение зонда по глубине (искомое) от давления P_1 к давлению P_2 (измеряемым); $\overline{\rho}(z)$ – средняя плотность воды на участке между давлениями P_1 и P_2 (измеряемая и вычисляемая); $g(\varphi, z)$ – ускорение силы тяжести для данных широты φ и диапазона глубин считаем известными, при малых Δz считаем фиксированным.



а) б) в)

Рис. 1. Графики изменений измеряемых величин при зондировании:
а) изменение гидростатического давления от времени; $P(t)$
б) изменение средней плотности морской воды от времени $\overline{\rho}(t)$;
в) изменение глубины погружения прибора во времени $z(t)$

Fig. 1. Graphs of changes in measured values during probing:
a) change in hydrostatic pressure over time $P(t)$;
b) change in the average density of sea water from time $\overline{\rho}(t)$;
c) change in the depth of immersion of the device in time $z(t)$

Рассмотрим процесс зондирования. Последовательность отсчетов измеряемых величин по времени будем отмечать номерами индексов. Из схемы зондирования вниз с достаточно высокой скоростью на рис. 1 следует, что гидростатическое давление P со временем растет.

Локальная плотность морской воды ρ может произвольно изменяться и её средние значения измеряются–вычисляются на отдельных неизвестных участках Δz профиля зондирования между последовательными отсчетами давления. Задача состоит в том, чтобы по измеряемым во времени функциям гидростатического давления и локальной плотности морской воды выразить глубину погружения прибора как функцию времени.

Поскольку никакой модели «стандартного» океана не используется, то вместо фиксированного значения давления атмосферы P_a необходимо его измерить непосредственно перед зондированием. В момент входа зонда в воду давление начинает резко возрастать линейно от P_a (рис. 1а), а локальная плотность возрастает скачком до некоторого уровня, который далее представляется её средним значением $\overline{\rho_1}$ до некоторого следующего измеряемого значения гидростатического давления P_1 (рис. 1б). Среднее значение $\overline{\rho_1}$ функции локальной плотности ρ_j может быть вычислено любым известным способом от измерения на заданной пространственной базе до подсчета средней амплитуды пакета мгновенных отсчетов ρ_j от 1 до *n*. В последнем случае частота дискретиза-

ции функции локальной плотности морской воды будет в *n* раз превышать частоту дискретизации величины гидростатического давления P_j.

Поскольку P_1 измеряется, а $\overline{\rho_1}$ определяется из измерения и вычисления, $g(\varphi, z_0)$ –вычисляется по известной формуле, то можно определить величину первого отрезка глубины

$$\Delta z_1 = \frac{P_1}{\overline{\rho_1}\, g(\varphi, z_0)}. \qquad (8)$$

Далее зонд проходит отрезок глубины Δz_2 до момента отсчета давления P_2, который равен

$$\Delta z_2 = \frac{P_2 - P_1}{g(\varphi, z_1)\overline{\rho_2}}. \qquad (9)$$

По аналогии, для любого отрезка по глубине Δz_j можно записать

$$\Delta z_j = \frac{P_j - P_{j-1}}{g(\varphi, z_j - 1)\overline{\rho_j}}. \qquad (10)$$

Значение числителя может быть > 0 (зонд заглубляется), = 0 (зонд завис на горизонте), < 0 (зонд всплывает).

Глубина погружения z_i, как алгебраическая сумма отрезков Δz_j при $j = 1$ до i, определится по формуле

$$z_i = \sum_{j=1}^{j=i} \Delta z_j = \sum_{j=1}^{i} \frac{P_j - P_{j-1}}{g(\varphi, j-1)\overline{\rho_j}}. \qquad (11)$$

Отметим, что используется $g(\varphi, z - z_{j-1})$, поскольку при вычислении Δz_j ещё не определено $g(\varphi, z_j)$.

Все величины в правой части выражения (11) известны: измеряемые P_j и P_{j-1}, измеряемо–вычисляемые $\overline{\rho_j}$ и стандартно вычисляемые $g(\varphi, z_{j-1})$. Глубина получена как функция времени z_i (рис. 1в). Результат не зависит от движения с непостоянной скоростью и отклонении от вертикали.

Следовательно, задача определения глубины погружения прибора при зондировании как функции времени решена.

Изложенный метод может быть использован для контроля перемещений по вертикали при движении подводного аппарата или буксируемого прибора на заданной глубине.

Рассмотрим вопросы точности. При заданных погрешностях измерения давлений, определения их разности, измерения локальной плотности и вычисления средней на интервале локальной плотности можно оценить погрешность результата при статическом состоянии среды. Учитывая, что имеет место суммирование многих отрезков Δz_j по выражению (11), а также операция вычисления средней локальной плотности $\overline{\rho_j}$, случайная составляющая инструментальной погрешности стремится к нулю.

Поэтому целесообразно в измерительных каналах давления и локальной плотности использовать аналого-цифровые преобразователи с высоким разрешением при большой составляющей случайной погрешности, например, типа ΣΔ-АЦП. Это позволит достичь инструментальной погрешности порядка единиц 10^{-5}.

Методическая абсолютная погрешность измерения–определения глубины погружения прибора зависит от вертикальных скоростей движения среды и прибора относительно среды. Погрешность равна расстоянию, на которое перемещается среда относительно прибора за время между двумя последовательными отсчетами давления P_{j-1} и P_j. По относительной величине она равна отношению абсолютной величины к расстоянию, которое зонд пройдет по вертикали за это же время. Поэтому погрешность будет тем меньше, чем выше скорость зондирования и частота измерений. В разных состояниях среды будет разная методическая погрешность с различными уровнями систематической и случайной составляющей. Например, в поле внутренних волн на некоторых участках профиля будет превалировать систематическая периодическая составляющая из-за вертикальной скорости среды до нескольких см/с. В общем случае на всей траектории зондирования методическая погрешность будет присутствовать как случайная помеха, которая будет усредняться также, как и случайная составляющая инструментальной погрешности. Можно оценить значение результирующей относительной погрешности измерения–определения глубины погружения прибора порядка 10^{-4}.

Заключение. Предложен метод определения глубины погружения зондов в море с измерением давления и локальной плотности морской воды с целью обеспечения гарантированной точности. Показано, что погрешность измерения в реальном море может быть уменьшена примерно на порядок.

Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС № госрегистрации 121122300070-9 "Разработка новых средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Левашов Д.Е.* Техника экспедиционных исследований: инструментальные методы и технические средства оценки промыслово-значимых факторов среды. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 400 с.

2. *Парамонов А.Н., Кушнир В.М., Заикин В.М.* Автоматизация гидрофизического эксперимента. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 224 с.

3. *Полосин А.С.* Вычисление скорости звука в морской воде. Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5. География, 1967. № 3, С. 101–104.

4. *Saunders P.M.* Practical conversion of pressure to depth // J. Phys. Oceanogr. 1981. 11. P. 573–574.

5. *Saunders P.M., Fofonoff N.P.* Conversion of pressure to depth in the ocean // Deep-Sea Res. 1976. 23. P. 109–111.

6. *Тароян Г.И., Воронова М.С.* Определение глубин погружения океанографической аппаратуры по гидростатическому давлению. Записки по гидрографии, 1968. № 1, С. 95–98.

7. *Федоров И.И.* О пересчете глубины в давление при определении скоростизвука в морской воде // Океанология, 1970. Т. 10. Вып. 1. С. 176–180.

8. *Парамонов А.Н., Кушнир В.М., Забурдаев В.И.* Современные методы и средства измерения гидрофизических параметров океана. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.

9. Millero E.J., Chetirkin P.V. The density of Caspian Sea waters // Deep-Sea Res. 1980. 27A. P. 265–271.

10. *Fofonoff N.P., Millard R.C.* Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater // UNESCO technical papers in marine science. 1983. N 44. 53 p.

11. *Забурдаев В.И., Гайский П.В.* Практические формулы взаимосвязи давления и глубины в Черном море. МГЖ. № 6, 2002. С. 36–43 с.

12. *IOC,* SCOR and IAPSO, 2010. The international thermodynamic equation of seawater 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. International Oceanographic Commission, Manuals and Guides. No. 56. UNESCO (English). 196 p. (Available from http://www.TEOS-10.org).

13. *Гайский В.А.* Гидростатический дифференциальный измеритель локальной плотности природных вод // Системы контроля окружающей среды. 2022. № 3 (45). С. 50–58. DOI: 10.33075/2220-5861-2021-3-50-58.

METHOD FOR DETERMINING THE DEVICE IMMERSSION DEPTH IN THE SEA DURING SOUNDING

V.A. Gaisky

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

It is proposed to measure hydrostatic pressure and local water density simultaneously during sounding and calculate the device immersion depth as the sum of the distance segments obtained by dividing the pressure increment by the product of the average local density in the segment between the readings of pressure and gravity. The result does not depend on the sounding speed and deviation from the vertical. The method is suitable for determining the deviation of the movement of an underwater vehicle or a towed device from a given depth. By averaging random measurement errors and additive random noise, a guaranteed accuracy of the order of 10^{-4} can be obtained.
Keywords: immersion depth, hydrostatic pressure, local density.

REFERENCES

1. *Levashov D.E.* Tekhnika ekspedicionnyh issledovanij: instrumental'nye metody i tekhnicheskie sredstva ocenki promyslovo-znachimyh faktorov sredy (Expeditionary Research Technique: Instrumental Methods and Technical Means for Evaluating Commercially Significant Environmental Factors). M.: Publishing House of VNIRO, 2003, 400 p.

2. *Paramonov A.N., Kushnir V.M., Zaikin V.M.* Avtomatizaciya gidrofizicheskogo eksperimenta (Automation of hydrophysical experiment). L.: Gidrometeoizdat, 1982. 224 p.

3. *Polosin A.S.* Vychislenie skorosti zvuka v morskoj vode (Calculation of the speed of sound in sea water). Vestn. Moscow University. Ser. 5. Geography, 1967, No. 3, pp. 101–104.

4. Saunders P.M. Practical conversion of pressure to depth // J. Phys. Oceanogr. 1981, 11, P. 573–574.

5. Saunders P.M., Fofonoff N.P. Conversion of pressure to depth in the ocean // Deep-Sea Res. 1976, 23, P. 109–111.

6. *Taroyan G.I., Voronova M.S.* Opredelenie glubin pogruzheniya okeanograficheskoj apparatury po gidrostaticheskomu davleniyu (Determination of the depths of immersion of oceanographic equipment by hydrostatic pressure). Notes on Hydrography, 1968, No. 1, pp. 95–98.

7. *Fedorov I.I.* O pereschete glubiny v davlenie pri opredelenii skorostizvuka v morskoj vode (On the conversion of depth into pressure when determining the speed of sound in sea water). Okeanologiya, 1970, Vol. 10. No. 1, pp. 176–180.

8. *Paramonov A.N., Kushnir V.M., Zaburdaev V.I.* Sovremennye metody i sredstva izmereniya gidrofizicheskih parametrov okeana (Modern methods and means of measuring the hydrophysical parameters of the ocean). Kiev: Nauk. dumka, 1979, 248 p.

9. Millero E.J., Chetirkin P.V. The density of Caspian Sea waters // Deep-Sea Res. 1980. 27A. P. 265–271.

10. Fofonoff N.P., Millard R.C. Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater // UNESCO technical papers in marine science. 1983. N 44. 53 p.

11. *Zaburdaev V.I., Gaisky P.V.* Prakticheskie formuly vzaimosvyazi davleniya i glubiny v CHernom more (Practical formulas for the relationship between pressure and depth in the Black Sea). MGJ, No. 6, 2002, pp. 36–43.

12. IOC, SCOR and IAPSO, 2010. The international thermodynamic equation of seawater 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. International Oceanographic Commission, Manuals and Guides. No. 56. UNESCO (English). 196 p. (Available from http://www.TEOS-10.org).

13. *Gaisky V.A.* Gidrostaticheskij differencial'nyj izmeritel' lokal'noj plotnosti prirodnyh vod (Hydrostatic differential meter of local density of natural waters). *Sistemy` kontrolya okruzhayushhej sredy*, 2022, No. 3 (45), pp. 50–58.

УДК 551.510.42 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-46-60

КАРБОНОВЫЕ ПОЛИГОНЫ ИОА СО РАН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ. ЧАСТЬ I

В.В. Антонович[1], О.Ю. Антохина[1], П.Н. Антохин[1], В.Г. Аршинова[1], М.Ю. Аршинов[1], Б.Д. Белан[1], С.Б. Белан[1], Д.К. Давыдов[1], Г.А. Ивлев[1], А.В. Козлов[1], Ш.Ш. Максютов[2], Т. Мачида[2], Д.А. Пестунов[1], И.В. Пташник[1], Т.М. Рассказчикова[1], Д.Е. Савкин[1], Сасакава[2], Д.В. Симоненков[1], Т.К. Скляднева[1], Г.Н. Толмачев[1], А.В. Фофонов[1]

[1]Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, РФ
[2]Национальный институту исследования окружающей среды, Тсукуба, Япония
E-mail: bbd@iao.ru

Наблюдающееся в настоящее время глобальное изменение климата и окружающей среды, которое связывают с ростом концентрации парниковых газов, требует организации контроля за их содержанием в атмосфере. В первой части работы описана история создания и развития наблюдательной сети постов контроля концентрации парниковых газов в РФ. Более подробно охарактеризована мониторинговая система ИОА СО РАН, развернутая на территории Западной Сибири. Она включает в себя 3 поста комплексного мониторинга состава воздуха и 2 стационара для измерения потоков парниковых газов на границе «почва-атмосфера».
Ключевые слова: атмосфера, закись азота, концентрация, метан, мониторинг, обсерватория, парниковые газы, пост, станция, углекислый газ.

Поступила в редакцию 24.08.2022. После доработки: 09.12.2022.

Введение. Атмосфера является главной частью окружающей среды, состояние которой в сильной степени определяет жизнь на Земле. Она тесно взаимодействует с биосферой, гидросферой, криосферой и литосферой, а также с городскими территориями на временных масштабах от секунд до тысячелетий. Изменения в одном из этих компонентов прямо или косвенно передаются другим через запутанные сложные процессы и обратные связи. Современные изменения в атмосфере, отражающиеся в потеплении климата, обусловлены в первую очередь ростом концентрации парниковых газов, аэрозолей и сажи. Следовательно, для более надежного прогнозирования климата необходимы максимально точные данные о распределении концентрации парниковых газов и тенденции их изменения, как в целом по земному шару, так и для отдельных регионов.

К середине прошлого столетия стало очевидным, что одних только регулярных метеорологических наблюдений недостаточно для оценки качества воздуха, а так называемый лос-анджелесский смог привел к пониманию того, что необходим и мониторинг состава атмосферы, особенно, в мегаполисах. В 50-х годах XX века Всемирная метеорологическая организация (ВМО) приняла решение о запуске программы по химии атмосферы, метеорологическим аспектам загрязнения воздуха с целью перехода от разрозненных нерегулярных наблюдений к непрерывному мониторингу [1]. Начиналась она, прежде всего, с создания наблюдательной сети за общим содержанием озона, задерживающего опасное для всего живого жесткое ультрафиолетовое солнечное излучение, и являющегося одним из самых токсичных газов.

Примерно в то же время, независимо от этой программы, Ч.Д. Килингом были начаты систематические измерения концентрации углекислого газа в обсерватории Мауна-Лоа и в Антарктиде. Уже в 1960 году он забил тревогу о росте содержания CO_2 в атмосфере и необходимости снижения антропогенных выбросов, показав, что скорость роста концентрации CO_2 на Южном полюсе соответствует количеству ископаемого топлива,

сжигаемого во всем мире за год [2]. На тот момент к работе Килинга не было проявлено должного интереса, и связанный с этим недостаток финансирования даже привел к временной приостановке измерений в 1964 г. [3]. Признание пришло гораздо позже (в начале 1970-х), после чего график многолетней изменчивости концентрации CO_2 стал носить его имя (Keeling curve).

К 1980-м годам всеобщее осознание проблем, связанных с изменением климата и ухудшением качества воздуха, привело к решению ВМО о создании в 1989 г. Глобальной службы атмосферы (ГСА), (Global Atmosphere Watch–GAW). Одной из целей которой является организация систематических наблюдений за химическим составом и связанными с ним физическими характеристиками атмосферы [1]. Для обеспечения высокого качества результатов интерпретации данных наблюдений как в глобальном, так и в региональном масштабе, ВМО постоянно устанавливает все более жесткие требования к точности измерения, прежде всего концентрации основных парниковых газов [4] и метеорологических величин [5]. В связи с этим, возникает необходимость постоянной модернизации оборудования и датчиков, устанавливаемых на наблюдательной сети. При этом для совместимости новых рядов наблюдений с полученными ранее, рекомендуется в течение нескольких лет проводить параллельные измерения, как приборами предыдущего поколения, так и новыми. Сеть станций ГСА ВМО состоит из 31 станции глобального уровня и более 400 станций регионального уровня [6]. Большинство станций обоих уровней содержатся за счет средств национальных агентств, метеорологических служб или научно-исследовательских организаций. Также в наблюдательную сеть ГСА вносят свой вклад еще около 100 станций, входящих в другие наблюдательные сети такие как: TCCON [7], EARLINET [8], AD-Net [9], LALINE [10], MPLNET [11], CASTNET [12] и IAGOS [13]. Подобные сети были созданы в США [14–16], Канаде [17], Европе [18–22].

Карбоновые полигоны. На территории РФ эта проблема усугубляется почти полным отсутствием таких данных. Согласно докладу Росгидромета [23], анализ изменчивости концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы выполняется на четырех станциях наблюдений, входящих в Глобальную службу атмосферы (ГСА) ВМО. Станции Териберка (Кольский полуостров, побережье Баренцева моря) и станция Тикси (Арктическое побережье, море Лаптевых, залив Сого) расположены в условиях, близких к фоновым. Новый Порт (полуостров Ямал, берег Обской губы) и Воейково (пригород Санкт-Петербурга) находятся в районах крупномасштабных антропогенных источников парниковых газов. Таким образом, на всю огромную страну приходиться только 2 фоновые государственные станции. Можно еще отметить обсерваторию ZOTTO, созданную в рамках международных проектов. Она находится в лесном массиве в 20 км западнее с. Зотино Красноярского края. На ее территории была установлена вантовая мачта высотой 301 м. Пробоотбор воздуха для газоанализа осуществляется с 6 уровней: 301, 227, 158, 92, 52, и 4 м [24]. В первые годы после запуска в эксплуатацию станции измерения парниковых газов осуществлялись с помощью газового хроматографа, который позднее был заменен на газоанализатор фирмы Picarro Model EnviroSense 3000i (более позднее наименование – G1301). Помимо измерений малых газовых составляющих, в обсерватории ZOTTO также имеется оборудование для проведения непрерывных измерений микрофизических и оптических характеристик аэрозолей, отбираемых с нескольких уровней. В дополнение к наблюдениям за потоками парниковых газов, выполняемым по градиентной методике на 301-метровой мачте, в окрестностях обсерватории организованы измерения потоков методом вихревой ковариации (eddy covariance) с использованием мачт меньшей высоты. Одна из измерительных площадок располагается в сосновом

лесу в 900 м северо-северо-восточнее от основной мачты, а вторая – на болоте в 3 км северо-восточнее от нее [25]. Обе площадки оснащены газоанализаторами CO_2 LI-7200 и ультразвуковыми 3-D анемометрами USA-1 фирмы METEK. Измерительный комплекс, расположенный на болоте дополнительно оснащен быстродействующим газоанализатором Picarro Model G2301-*f*.

При отсутствии централизованного финансирования ряд, организаций РФ начал создавать подобные пункты мониторинга в инициативном порядке или в рамках международных проектов. Одной из таких организаций является Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН), создавший несколько стационарных и передвижных пунктов. В первой части работы дается их подробное описание. Результаты мониторинговых измерений концентрации парниковых газов приводятся во второй части статьи.

TOR-станция. Исторически первой (в декабре 1992 года) была создана TOR-станция в рамках международного проекта по исследованию тропосферного озона TOR (Tropospheric Ozone Research) европейской программы EUROTRAC. Она работает и в настоящее время. Она находится на северо-восточной окраине Томского Академгородка. Имеет координаты: 56°28′41″ с.ш., 85°03′15″ в.д. Высота над уровнем 133 м . Структурная схема станции приведена на рис.1, технические характеристики в табл.1. Полное описание дано в [26].

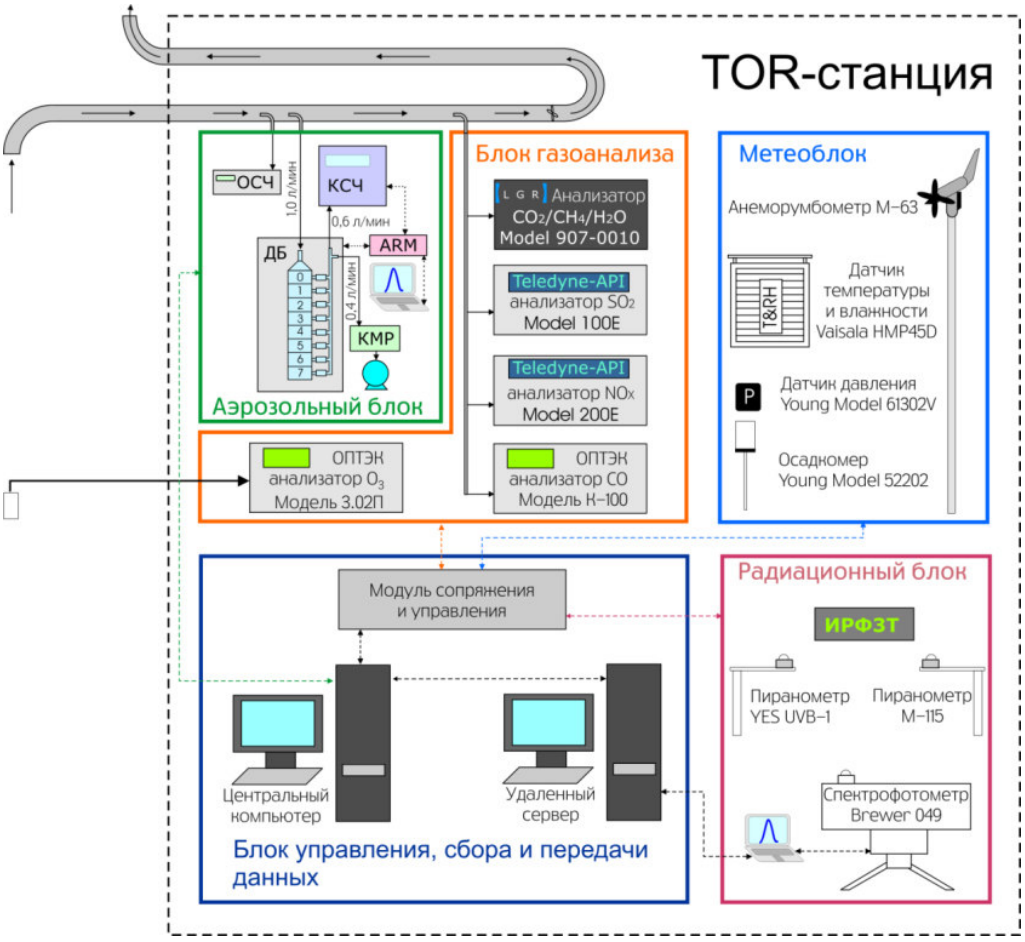


Рис. 1. Структурная схема TOR-станции
Fig. 1. Structural diagram of a TOR-station

Таблица 1. Технические характеристики оборудования TOR-станции

Блок	Прибор/датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погрешность	Начало ряда
Метеоблок	Vaisala HMP45D	t,°C U,%	-40...+60 0...100	±0,2 °C ±2%	1992
	М-63	dd, град V, м/с	0...360 1,2...40	±10° ±(0,5+0,05 V)	1992
	Young Model 61302	P, гПа.	150...1150	±0,3 гПа	2002
	Young Model 52202	Интенсивность и количество осадков	0…50 мм/ч	±2% (<25 мм/ч) ±3% (>25 мм/ч)	2012
Блок газоанализа	LGR FGGA Model 907-0010	CO_2, млн$^{-1}$ CH_4, млн$^{-1}$ H_2O, млн$^{-1}$	20...10000 0,005...50 150...70000	±0,2 млн$^{-1}$ ±0,001 млн$^{-1}$ ±100 млн$^{-1}$	2012
	ОПТЭК 3.02-П	O_3, мкг/м^3	0...500	± 20%	1993
	Teledyne API 200E	NO/NO_2, млн$^{-1}$	0...20	± 0,5%	2008
	ОПТЭК К-100	CO, мг/м^3	0...50	± 20%	2002
	Teledyne API 100E	SO_2, млн$^{-1}$	0...20	± 0,5%	2012
Аэрозольный блок	GRIMM #1.109	D_p, мкм (31 канал) N, см$^{-3}$	0,25...32 0...2000	– ± 3%	2010
	Диффузионный спектрометр аэрозоля	D_p, нм (20 каналов) N, см$^{-3}$	3...200 0...500000	– ± 10%	2010
Радиационный блок	М-115	λ, мкм Q, Вт/м^2	0,3...2,4 0...1500	± 10%	1995
	YES UVB-1	λ, нм I, Вт/м^2	280...320 0...2,5	– < 5%	2002
	Brewer 049	λ, нм I, Вт/м^2	290...325 –	– –	2012-2017
	ИРФ3Т	γ-фон, мкР/ч	1...1000	±30%	1993

Обсерватория «Фоновая». Расположена на восточном берегу реки Оби, в 60 км к западу от Томска. Имеет координаты 56°25′07″ с.ш., 84°04′27″ в.д. Высота над уровнем моря 80 м. Территория окружена смешанным лесом (березы, осины и сосны обыкновенные). Большая площадь между станцией и городом Томском покрыта хвойными деревьями. Крупных промышленных объектов вблизи обсерватории не имеется.

На рис. 2 приведено схематическое изображение аппаратного помещения и мачты с указанием высот, на которых установлены метеорологические датчики и заборники воздуха. Для более точного определения стратификации атмосферы метеорологические датчики установлены на четырех уровнях. Расположение заборников малых газовых составляющих на двух уровнях позволяет определять не только концентрации газов, но и выявлять вертикальные градиенты концентраций, отражающие влияние отдаленных и локальных источников.



Рис. 2. Изображение мачты и аппаратного помещения Обсерватории «Фоновая»
Fig. 2. Image of the mast and the hardware room of the Observatory "Fonovaya"

Структурная схема Обсерватории «Фоновая» приведена на рис. 3. Технические характеристики собраны в табл. 2. Полное описание станции дано в [27].

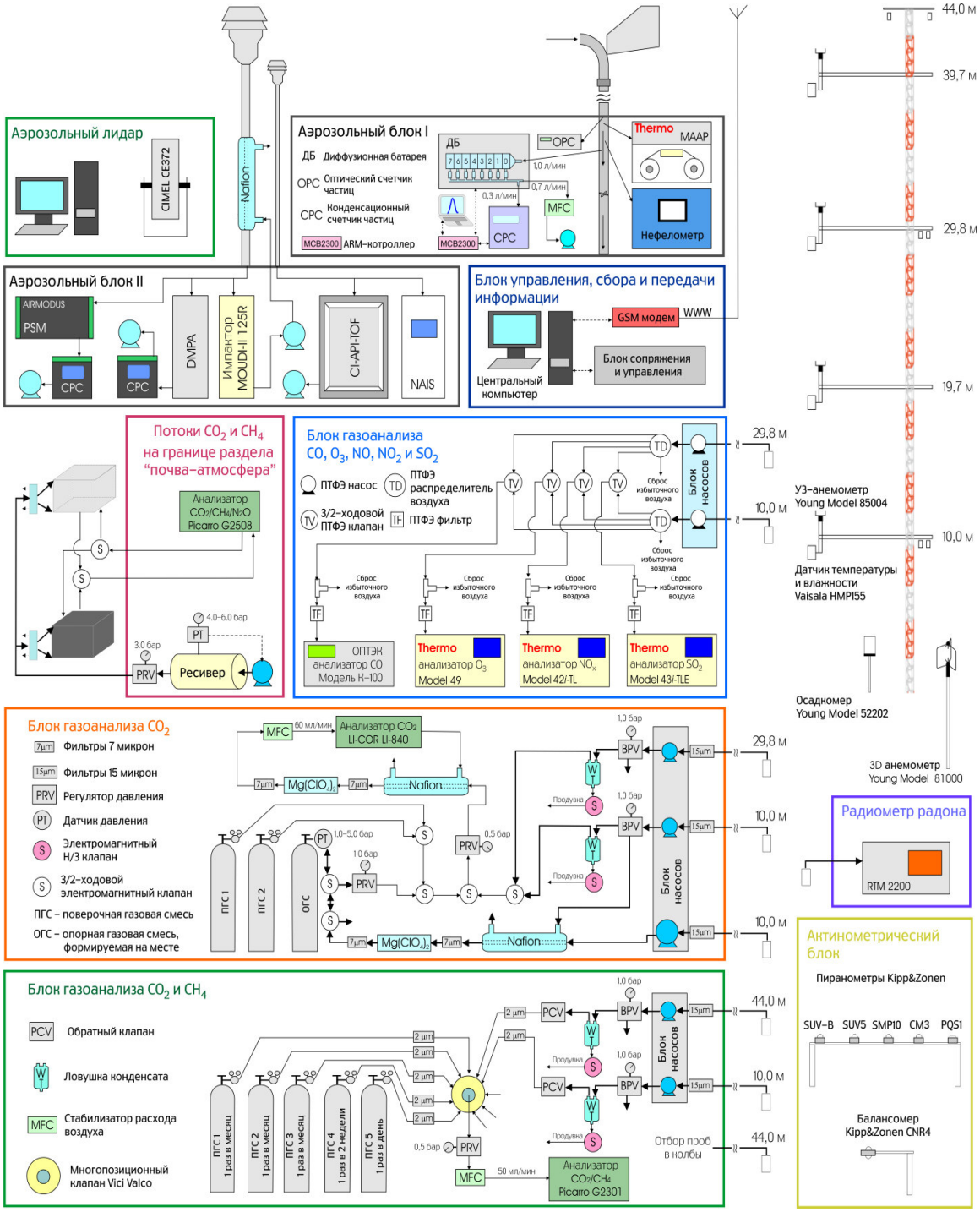


Рис. 3. Структурная схема Обсерватории «Фоновая»
Fig. 3. Block diagram of the Observatory "Fonovaya"

Таблица 2. Технические характеристики Обсерватории «Фоновая»

Блок	Прибор/датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погреш-ность	Начало ряда
Метеоблок	Vaisala HMP155	t,°C U,%	-80...+60 0...100	±0,12 °C ±1%	2015
	Young Model 85004	dd, град V, м/с	0...360 0...70	±1° ±0,1 м/с	2015
	Young Model 81000	U,V, W, м/с	0…40	±0,05 м/с	2020
	Young Model 61302	P, гПа	150...1150	±0,3 гПа	2015
	Young Model 52202	Интенсивность и количество осадков	0…50 мм/ч	±2% (<25 мм/ч), ±3% (>25 мм/ч)	2012
	«АПИК»	t почвы,°C Глубины, см	-55…125 0…320	±0,01	2020
Блок газо-анализа	Picarro G2301-m	CO_2, млн$^{-1}$ CH_4, млн$^{-1}$ H_2O, млн$^{-1}$	0...1000 0...20 0...70000	< 0,2 млн$^{-1}$ <0,0015 млн$^{-1}$ < 150 млн$^{-1}$	2016
	LI-COR LI-840	CO_2, млн$^{-1}$	0...1000	< 0,2* млн$^{-1}$	2009
	ОПТЭК 3.02-П	O_3, мкг/м^3	0...500	± 20%	2009-2019
	Thermo Model 49	O_3, млрд$^{-1}$	0…1000	± млрд$^{-1}$	2019
	ОПТЭК К-100	CO, мг/м^3	0...50	± 20%	2009
	Model 42*i*-TL	NO/NO_2, мкг/м^3	0...10/500	± 1%	2017
	Model 43*i*-TLE	SO_2, мкг/м^3	0...20/2000	± 1%	2017
	Picarro G2508-m (измерение потоков «почва-атмосфера»)	CO_2, млн$^{-1}$ CH_4, млн$^{-1}$ N_2O, млн$^{-1}$	20...5000 0,5...15 0...400	< 0,6 млн$^{-1}$ < 0,01 млн$^{-1}$ < 0,025 млн$^{-1}$	2016
	Радиометр Rn и Tn SARAD RTM 2200	объемная активность Rn и Tn, Бк/м³	0…10^7	± 1 Бк/м³	2019
Аэрозольный блок	Диффузионный спектрометр аэрозоля	D_p, нм (20 каналов) N, см$^{-3}$	3...200 0...10^6	– ± 10%	2011
	GRIMM #1.108	D_p, мкм (15 канал) N, см$^{-3}$	0,3...20 0...2000	– ± 3%	2010
	Нефелометр ФАН-А	μ (45°), км$^{-1}$ ср$^{-1}$ λ=0,46/0,53/0,59/0,63	0,001…1	± 3%	2013
	Фотометр Thermo Model 5012 MAAP	BC, мкг/м^3	0…180	1%	2013

Продолжение таблицы 2

Блок	Прибор/датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погрешность	Начало ряда
	Спектрометр аэроионов и нейтральных кластеров NAIS	D_p ионов, нм D_p кластеров, нм N, см$^{-3}$	0,8...40 2...40 0...10^5	10%	2019
	Спектрометр наночастиц Airmodus A11 nCNC	D_p, нм N, см$^{-3}$	1...4 0...10^5	20%	2019
	Дифференциальный спектрометр подвижности частиц DMPS	D_p (26 каналов), нм N, см$^{-3}$	4...1000 0...10^5	10%	2020
	Времяпролетный масс-спектрометр CI-API-TOF	Химический состав ионов и нейтральных кластеров	1…2500 а.е.м.	–	2020
Радиационный блок	Kipp&Zonen CM3	λ, мкм Q, Вт/м^2	0,305...2,8 0...2000	< ± 2%	2016
	Kipp&Zonen SMP10	λ, мкм Q, Вт/м^2	0,285...2,8 0...4000	< ± 2%	2020
	Kipp&Zonen SUV5	λ, мкм УФ, Вт/м^2	0,280...0,4 0...400	< ± 1,5%	2020
	Kipp&Zonen SUV-B	λ, мкм УФ-В, Вт/м^2	0,28..0,315 0...9	< ± 2%	2020
	Kipp&Zonen CNR4	λ, мкм λ, мкм В, Вт/м^2	0,3...2,8 4,5…42 -200...+800	< ± 2%	2020
	Kipp&Zonen PQS1	λ, мкм ФАР, мкмоль м$^{-2}$ с$^{-1}$	0,4...0,7	< ± 2%	2019

* при калибровке поверочными газовыми смесями (ПГС).

Для обеспечения высокого качества результатов интерпретации данных наблюдений как в глобальном, так и в региональном масштабе, Всемирная метеорологическая организация (ВМО) постоянно устанавливает все более жесткие требования к точности измерения, прежде всего концентрации основных парниковых газов. В связи с этим для постоянной калибровки система газоанализа CO_2 и CH_4 была оснащена поверочными газовыми смесями (ПГС), изготовленными компанией Deuste Steininger GmbH в соответствии с требованиями ВМО (табл. 3).

Таблица 3. Концентрация газов в поверочных смесях

ПГС	CO_2, млн$^{-1}$	CH_4, млрд$^{-1}$ *
1	370, 91±0,005	1814,35±0,15
2	390,52±0,004	1962,69±0,077
3	400,85±0,001	2006,66±0,094
4	420,89±0,007	2209,63±0,107
5	430,87±0,006	2205,01±0,106
6*	390,33±0,009	1960,99±0,094

* резервная ПГС.

Для управления всем измерительным комплексом станции, а также сбора и передачи данных было разработано оригинальное программное обеспечение (ПО) в среде LabView 8.5. Оно позволяет работать комплексу, как в автоматическом, так и в ручном режимах. Автоматический режим реализуется при помощи задания алгоритма измерений. Каждый шаг алгоритма содержит команду действия и время, по которому должна выполняться последовательность действий.

Предусмотрены такие команды как: включение/выключение клапанов подачи проб воздуха или ПГС/ОГС; начать/закончить измерения; расчет калибровочных коэффициентов; сохранение и передача данных, а также ряд сервисных команд. В конце каждого цикла измерений происходит запись всех полученных данных, включая сервисные, в первичную базу данных (БД). Затем через GSM-канал сотовой сети устанавливается соединение с центральным сервером в ИОА СО РАН, после чего все данные, которые были получены на предыдущих этапах, передаются на удаленный сервер, где происходит их запись в основную и резервную БД.

В 2016 году для проведения измерений потоков парниковых газов на границе раздела почвы и атмосферы на территории измерительного комплекса были установлены две автоматические камеры (производства ИОА СО РАН [28]) прозрачная и затемненная (рис. 4). Измерения потоков парниковых газов между почвой и атмосферой в течение вегетационного сезона выполняются комплексом, состоящим из анализатора Picarro G2508 $N_2O/CH_4/CO_2/NH_3/H_2O$ и автоматической статических камер, разработанных в ИАО СО РАН. Анализатор G2508 работает в режиме рециркуляции, с использованием вакуумного насоса Picarro A0702 с обратной связью. Непрозрачная камера используется для измерения дыхания экосистемы, а прозрачная камера – для измерения нетто - экосистемного обмена (NEE), что позволяет определять валовую первичную продуктивность (GPP). Камеры имеют объём 0,324 м3. Они открываются и закрываются автоматически с помощью пневматической системы управления в соответствии со следующим графиком: 1 – одна камера закрыта (5 мин), другая открыта (5 мин); 2 – затем наоборот (5 мин); 3 – обе камеры открыты (10 мин) на проветривание с целью нормализации условий естественного состояния экосистемы; и так далее (всего 3 цикла в час).

Обсерватория Базовый экспериментальный комплекс (БЭК). Для контроля концентрации парниковых газов в пригородном районе была запущена обсерватория «Базовый экспериментальный комплекс» в 3 км к востоку от TOR-станции. Имеет координаты 56°28′49″ с.ш., 85°06′08″ в.д. Высота над уровнем моря 120 м. Внешний вид станции и размещение оборудования приведены на рис. 5. Технические характеристики в табл. 4.

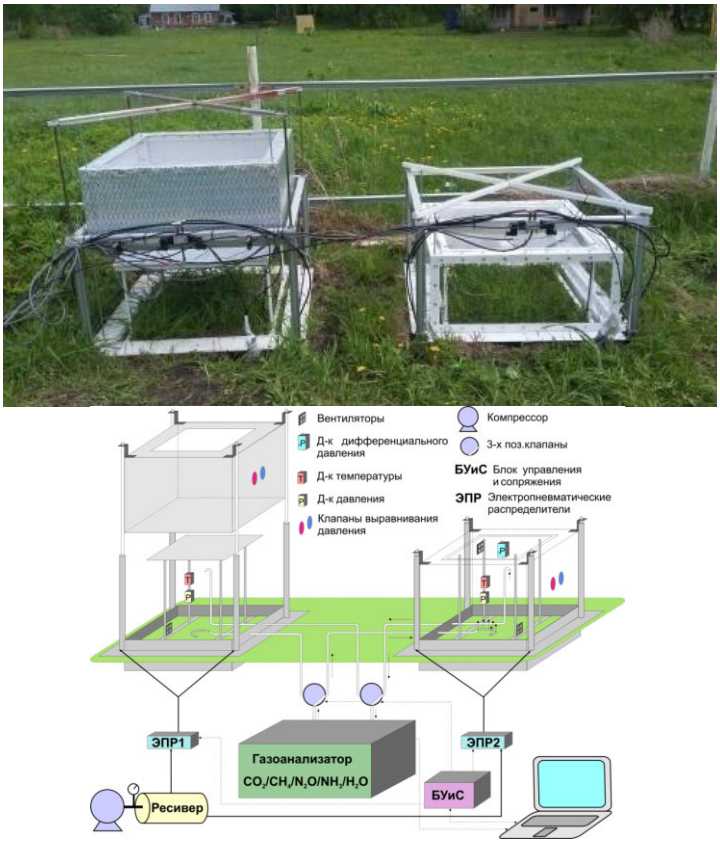


Рис. 4. Внешний вид и структурная схема камер для измерения потоков парниковых газов
Fig. 4. Appearance and block diagram of chambers for measuring greenhouse gas flows



Рис. 5. Внешний вид БЭКа и оборудование в контейнере
Fig. 5. BEC appearance and equipment in a container

Таблица 4. Технические характеристики обсерватории БЭК

Блок	Прибор/датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погрешность	Начало ряда
Метеоблок	Vaisala HMP45D	t,°C U,%	-40...+60 0...100	±0,2 °C ±2%	2018
	Young Model 05103	dd, град V, м/с	0...360 0...60	±3° ±0,3 м/с	2018
Блок газоанализа	LI-COR LI-820	CO_2, млн$^{-1}$	0...1000	< 0,2* млн$^{-1}$	2009-2016 2021
	ОПТЭК 3.02-П	O_3, мкг/м^3	0...500	± 20%	2009-2016
	ОПТЭК К-100	CO, мг/м^3	0...50	± 20%	2009-2016
	Teledyne API 200E	NO/NO_2, млн$^{-1}$	0…20	±0,5%	2009-2016
	ME 9850B	SO_2, млн$^{-1}$	0…20	±1%	2009-2016
	HCNM 2000G	CH4 и ΣCH, млн$^{-1}$	0...10	0,1	2009-2014
Радиационный блок	Kipp&Zonen CM3	λ, мкм Q, Вт/м^2	0,305...2,8 0...2000	< ± 2%	2019
	Kipp&Zonen PQS1	λ, мкм ФАР, мкмоль м$^{-2}$ с$^{-1}$	0,4...0,7	< ± 2%	2019

* при калибровке поверочными газовыми смесями (ПГС).

Заключение. Для проведения мониторинга состава воздуха на территории Западной Сибири было создано 3 поста комплексного мониторинга и 2 стационара измерения потоков парниковых газов на границе почва-атмосфера.

Результаты мониторинга состава воздуха с их помощью приведены в части 2.

Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН, проект ВИП ГЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *World* Meteorological Organization WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016-2023. GAW Report No 228. WMO, 2017. 75 p.

2. *Keeling, C.D.* The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere // Tellus. 1960. V.12. N2. P. 200–203.

3. *Nisbet E.* Earth monitoring: Cinderella science // Nature. 2007. V. 450. N. 7171. P. 789–790.

4. *World* Meteorological Organization. 18th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Tracers Measurement Techniques (GGMT-2015). GAW report N° 229. WMO, 2016. 137 p.

5. *World* Meteorological Organization. Guide to meteorological instruments and methods of observation. 2014. WMO N°8 (2014 edition). 1127 p.

6. *The Global* Atmosphere Watch Programme: 25 Years of Global Coordinat-

ed Atmospheric Composition Observations and Analyses. 2014. WMO No. 1143.

7. *Wunch D., Toon G.C., Blavier J.F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., and Wennberg P.O.* The Total Carbon Column Observing Network // Philos. T. R. Soc. A. 2011. V. 369. N. 1943. P. 2087–2112.

8. *Ortiz-Amezcua P., Guerrero-Rascado L.L., Granados-Muñoz M.J., Benavent-Oltra J.A., Böckmann Ch., Samaras S., Stachlewska I.S., Janicka L., Baars H., Bohlmann S., and Alados-Arboledas L.* Microphysical characterization of long-range transported biomass burning particles from North America at three EARLINET stations // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. N. 9. P. 5931-5946.

9. *Sugimoto N., Shimizu A., Nishizawa T., Matsui I., Jin Y., Khatri P, Irie H, Takamura T., Aoki K. and Thana B.* Aerosol characteristics in Phimai, Thailand determined by continuous observation with a polarization sensitive Mie–Raman lidar and a sky radiometer // Environmental Research Letters. 2015. V. 10. N. 6. 065003, doi:10.1088/1748-9326/10/6/065003.

10. *Antuña-Marrero J.C., Landulfo E., Estevan R., Barja B., Robock A., Wolfram E., Ristori P., Clemesha B., Zaratti F., Forno R., Armandillo E., Bastidas Á.E., de Frutos Baraja Á.M., Whiteman D.N., Quel E., Barbosa H.M., Lopes F., Montilla-Rosero E., and Guerrero-Rascado J.L.* LALINET: The First Latin American–Born Regional Atmospheric Observational Network // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2017. V. 98. N. 6. P. 1255–1275.

11. *Lewis J.R., Campbell J.R., Welton E.J., Stewart S.A., and Haftings P.C.* Overview of MPLNET Version 3 Cloud Detection // J. Atmos. Oceanic Tech. 2016. V. 33. N.10. P. 2113–2134.

12. *Sickles II J.E. and Shadwick, D.S.* Air quality and atmospheric deposition in the eastern US: 20 years of change //Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. N. 1. P. 173–197.

13. *Petzold A., Thouret V, Gerbig C., Zahn A, Brenninkmeijer C.A.M., Gallagher M., Hermann M., Pontaud M., Ziereis H., Boulanger D., Marshall J, Nédélec P, Smit H.G.J., Friess U., Flaud J.-M., Wahner A., Cammas J.-P., Volz-Thomas A.* & IAGOS TEAM. Global-scale atmosphere monitoring by in-service aircraft–current achievements and future prospects of the European Research Infrastructure IAGOS // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2015. V.67. N.1. https://doi.org/10.3402/tellusb.v67.28452.

14. *Andrews A.E., Kofler J.D., Trudeau M.E., Williams J.C., Neff D.H., Masarie K.A., Chao D.Y., Kitzis D.R., Novelli P.C., Zhao C.L., Dlugokencky E.J., Lang P.M., Crotwell M.J., Fischer M.L., Parker M.J., Lee J.T., Baumann D.D., Desai A.R., Stanier C.O., De Wekker S.F.J., Wolfe D.E., Munger J.W. and Tans P.P.* CO_2, CO, and CH_4 measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Network: instrumentation, uncertainty analysis, and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7. № 2 P. 647–687.

15. *Zhao, C.L., Bakwin, P.S., and Tans, P.P.* A design for unattended monitoring of carbon dioxide on a very tall tower // J. Atmos. Ocean. Technol. 1997. V. 14. № 5. P. 1139–1145.

16. *Bakwin P., Tans P.P., Hurst D.F., and Zhao C.L.* Measurements of carbon dioxide on very tall towers: results of the NOAA/CMDL program // Tellus Ser. B-Chemical and Physical Meteorology. 1998. V. 50. № 5. P. 401–415.

17. *Higuchi K., Worthy D., Chan D., Shashkov A.* Regional source/sink impact on the diurnal, seasonal and inter-annual variations in atmospheric CO_2 at a boreal forest site in Canada // Tellus B. 2003. V. 55. № 2. P. 115–125.

18. *Thompson R.L., Manning A.C., Gloor E., Schultz U., Seifert T., Hansel F., Jordan A., and Heimann M.* In-situ measurements of oxygen, carbon monoxide and greenhouse gases from Ochsenkopf tall tower in Germany, Atmos. Meas. Tech. 2009. V. 2. № 2. P. 573–591.

19. *Popa M.E., Gloor M., Manning A.C., Jordan A., Schultz U., Haensel F., Seifert T. and Heimann M.* Measurements of greenhouse gases and related tracers at Bialystok tall tower station in Poland // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. № 2. P. 407–427.

20. *Vermeulen A.T., Hensen A., Popa M.E., van den Bulk W.C.M. and Jongejan P.A.C.* Greenhouse gas observations from Cabauw Tall Tower (1992–2010) // Atmos. Meas. Tech. 2011. V. 4. № 3. P. 617– 644.

21. *Kadygrov N., Broquet G., Chevallier F., Rivier L., Gerbig C., and Ciais P.* On the potential of the ICOS atmospheric CO_2 measurement network for estimating the biogenic CO_2 budget of Europe // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. N. 22. P. 12765–12787.

22. *Hari P. and Kulmala M.* Station for Measuring Ecosystem–Atmosphere Relations (SMEAR II). Boreal Env. Res. 2005. V. 10. N. 5. P. 315–322.

23. *Обзор* состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2019 год. Росгидромет, 2020. 217 с.

24. *Winderlich J., Chen H., Gerbig C., Seifert T., Kolle O., Lavrič J. V., Kaiser C., Höfer A., and Heimann M*. Continuous low-maintenance CO_2/CH_4/H_2O measurements at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. № 4. P. 1113–1128.

25. *Winderlich J., Gerbig C., Kolle O. and Heimann M*. Inferences from CO_2 and CH_4 concentration profiles at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) on regional summertime ecosystem fluxes // Biogeosciences. 2014 V. 11. № 7. P. 2055–2068.

26. *Davydov D.K., Belan B.D., Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Antonovich V.V., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Akhlyostin A.Yu., Belan S.B., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fazliev A.Z., Fofonov A.V.* Monitoring of Atmospheric Parameters: 25 Years of the Tropospheric Ozone Research Station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences // Atmospheric and Oceanic Optics, 2019, Vol. 32, No. 2, pp. 180–192.

27. *Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Ивлев Г.А.* Автоматическая камера для измерения потоков парниковых газов на поверхности раздела почва-атмосфера. Патент на полезную модель № 169373 от 15 марта 2017 г.

28. *Antonovich V.V., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Balin Yu.S., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Kokhanenko G.P., Novoselov M.M., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chernov D.G., Smargunov V.P., Yausheva E.P., Paris J.-D., Ancellet G., Law K.S., Pelon J., Machida T., Sasakawa M.* Station for the comprehensive monitoring of the atmosphere at Fonovaya Observatory, West Siberia: current status and future needs // Proceedings of SPIE. 2018. V.10833. CID: 10833 7Z. [10833-189]. DOI: 10.1117/12.2504388.

CARBONIC POLYGONS OF THE IOA SB RAS FOR STUDYING THE DYNAMICS OF GREENHOUSE GASES IN THE ATMOSPHERE. PART I

V.V. Antonovich[1], O.Yu. Antokhina[1], P.N. Antokhin[1], V.G. Arshinova[1], M.Yu. Arshinov[1], B.D. Belan[1], S.B. Belan[1], D.K. Davydov[1], G.A. Ivlev[1], A.V. Kozlov[1], Sh.Sh. Maksyutov[2], T. Machida[2], D.A. Pestunov[1], I.V. Ptashnik[1], T.M. Rasskazchikova[1], D.E. Savkin[1], Sasakawa[2], D.V. Simonenkov[1], T.K. Sklyadneva[1], G.N. Tolmachev1, A.V. Fofonov[1]

[1]Institute of Atmospheric Optics named after V.E. Zuev, SB of RAS, Tomsk, RF
[2]National Institute for Environmental Research, Tsukuba, Japan

The currently observed global climate and environmental change, which is supposed to be related to an increase in the concentration of greenhouse gases, requires the organization of control over their content in the atmosphere. The first part of the work focuses on the history of the creation and development of an observational network of monitoring posts for monitoring the concentration of greenhouse gases in the Russian Federation. The monitoring system of the IAO SB RAS, deployed on the territory of Western

Siberia, is described in more detail. It includes 3 posts for comprehensive monitoring of air composition and 2 stations for measuring greenhouse gas fluxes at the soil-atmosphere boundary.
Keywords: atmosphere, nitrous oxide, concentration, methane, monitoring, observatory, greenhouse gases, post, station, carbon dioxide.

REFERENCES

1. *World* Meteorological Organization WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016-2023. GAW Report No 228. WMO, 2017, 75 p.

2. *Keeling, C.D.* The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere // Tellus. 1960, Vol. 12, No. 2, pp. 200–203.

3. *Nisbet E.* Earth monitoring: Cinderella science // Nature. 2007. Vol. 450, No. 7171, pp. 789–790.

4. *World* Meteorological Organization. 18th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Tracers Measurement Techniques (GGMT-2015). GAW report N° 229. WMO, 2016. 137 p.

5. *World* Meteorological Organization. Guide to meteorological instruments and methods of observation. 2014. WMO N°8 (2014 edition). 1127 p.

6. *The Global* Atmosphere Watch Programme: 25 Years of Global Coordinated Atmospheric Composition Observations and Analyses. 2014. WMO, No. 1143.

7. *Wunch D., Toon G.C., Blavier J.F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., and Wennberg P.O.* The Total Carbon Column Observing Network // Philos. T. R. Soc. A. 2011, Vol. 369, No. 1943, pp. 2087–2112.

8. *Ortiz-Amezcua P., Guerrero-Rascado L.L., Granados-Muñoz M.J., Benavent-Oltra J.A., Böckmann Ch., Samaras S., Stachlewska I.S., Janicka L., Baars H., Bohlmann S., and Alados-Arboledas L.* Microphysical characterization of long-range transported biomass burning particles from North America at three EARLINET stations // Atmos. Chem. Phys. 2017, Vol. 17, No. 9, pp. 5931–5946.

9. *Sugimoto N., Shimizu A., NishizawaT., Matsui I., Jin Y., Khatri P, Irie H, Takamura T., Aoki K. and Thana B.* Aerosol characteristics in Phimai, Thailand determined by continuous observation with a polarization sensitive Mie–Raman lidar and a sky radiometer // Environmental Research Letters. 2015, Vol. 10, No. 6, 065003, doi:10.1088/1748-9326/10/6/065003.

10. *Antuña-Marrero J.C.*, *Landulfo E., Estevan R., Barja B., Robock A., Wolfram E., Ristori P., Clemesha B., Zaratti F., Forno R., Armandillo E., Bastidas Á.E., de Frutos Baraja Á.M., Whiteman D.N., Quel E., Barbosa H.M., Lopes F., Montilla-Rosero E., and Guerrero-Rascado J.L.* LALINET: The First Latin American–Born Regional Atmospheric Observational Network // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2017, Vol. 98, No. 6, pp. 1255–1275.

11. *Lewis J.R., Campbell J.R., Welton E.J., Stewart S.A., and Haftings P.C.* Overview of MPLNET Version 3 Cloud Detection // J. Atmos. Oceanic Tech. 2016, Vol. 33, No.10, pp. 2113 – 2134.

12. *Sickles II J.E. and Shadwick, D.S.* Air quality and atmospheric deposition in the eastern US: 20 years of change //Atmos. Chem. Phys. 2015, Vol. 15, No. 1, pp. 173–197.

13. *Petzold A., Thouret V, Gerbig C., Zahn A, Brenninkmeijer C.A.M., Gallagher M., Hermann M., Pontaud M., Ziereis H., Boulanger D., Marshall J, Nédélec P, Smit H.G.J., Friess U., Flaud J.-M., Wahner A., Cammas J.-P., Volz-Thomas A.* & IAGOS TEAM. Global-scale atmosphere monitoring by in-service aircraft – current achievements and future prospects of the European Research Infrastructure IAGOS // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2015, Vol. 67, No. 1. https://doi.org/10.3402/tellusb.v67.28452.

14. *Andrews A.E., Kofler J.D., Trudeau M.E., Williams J.C., Neff D.H., Masarie K.A., Chao D. Y., Kitzis D.R., Novelli P. C., Zhao C. L., Dlugokencky E.J., Lang P.M., Crotwell M.J., Fischer M.L., Parker M.J., Lee J.T., Baumann D. D., Desai A. R., Stanier C.O., De Wekker S.F. ., Wolfe D.E., Munger J.W. and Tans P.P.* CO_2, CO, and CH_4 measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Network: instrumentation, uncertainty analysis, and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts // Atmos. Meas. Tech. 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 647–687.

15. *Zhao, C.L., Bakwin, P.S., and Tans, P.P.* A design for unattended monitoring of carbon dioxide on a very tall tower // J. Atmos. Ocean. Technol. 1997, Vol. 14, No. 5, pp. 1139–1145.

16. *Bakwin P.S., Tans P.P., Hurst D.F., and Zhao C.L*. Measurements of carbon dioxide on very tall towers: results of the NOAA/CMDL program // Tellus Ser. B-Chemical and Physical Meteorology. 1998, Vol. 50, No. 5, pp. 401–415.

17. *Higuchi K., Worthy D., Chan D., Shashkov A.* Regional source/sink impact on the diurnal, seasonal and inter-annual variations in atmospheric CO_2 at a boreal forest site in Canada // Tellus B. 2003, Vol. 55, No, 2, pp. 115–125.

18. *Thompson R.L., Manning A.C., Gloor E., Schultz U., Seifert T., Hansel F., Jordan A., and Heimann M.* In-situ measurements of oxygen, carbon monoxide and greenhouse gases from Ochsenkopf tall tower in Germany, Atmos. Meas. Tech. 2009, Vol. 2, No. 2, pp. 573–591.

19. *Popa M.E., Gloor M., Manning A.C., Jordan A., Schultz U., Haensel F., Seifert T. and Heimann M*. Measurements of greenhouse gases and related tracers at Bialystok tall tower station in Poland // Atmos. Meas. Tech. 2010, Vol. 3, No. 2, pp. 407–427.

20. *Vermeulen A.T., Hensen A., Popa M.E., van den Bulk W.C.M. and Jongejan P.A.C.* Greenhouse gas observations from Cabauw Tall Tower (1992–2010) // Atmos. Meas. Tech. 2011, Vol. 4, No. 3, pp. 617– 644.

21. *Kadygrov N., Broquet G., Chevallier F., Rivier L., Gerbig C., and Ciais P. On* the potential of the ICOS atmospheric CO_2 measurement network for estimating the biogenic CO_2 budget of Europe // Atmos. Chem. Phys. 2015, Vol. 15, No. 22, pp. 12765–12787.

22. *Hari P. and Kulmala M*. Station for Measuring Ecosystem–Atmosphere Relations (SMEAR II). Boreal Env. Res. 2005. V.10. N.5. P. 315–322.

23. *Obzor* sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy v Rossijskoj Federacii za 2019 god. (Overview of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2019). Rosgidromet, 2020. 217 p.

24. *Winderlich J., Chen H., Gerbig C., Seifert T., Kolle O., Lavrič J.V., Kaiser C., Höfer A., and Heimann M*. Continuous low-maintenance $CO_2/CH_4/H_2O$ measurements at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) in Central Siberia // Atmos. Meas. Tech. 2010, Vol. 3, No. 4, pp. 1113–1128.

25. *Winderlich J., Gerbig C., Kolle O. and Heimann M.* Inferences from CO_2 and CH_4 concentration profiles at the Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO) on regional summertime ecosystem fluxes // Biogeosciences. 2014, Vol. 11. No. 7, pp. 2055–2068.

26. *Davydov D.K., Belan B.D., Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Antonovich V.V., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Akhlyostin A.Yu., Belan S.B., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fazliev A.Z., Fofonov A.V.* Monitoring of Atmospheric Parameters: 25 Years of the Tropospheric Ozone Research Station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences // Atmospheric and Oceanic Optics, 2019, Vol. 32, No. 2, pp. 180–192.

27. *Btlan B.D., Arshinov M.YU., Davydov D.K., Kozlov A.V., Ivlev G.A*. Avtomaticheskaya kamera dlya izmereniya potokov parnikovyh gazov na poverhnosti razdela pochva-atmosfera (Automatic chamber for measuring greenhouse gas fluxes at the soil-atmosphere interface). Patent na poleznuyu model' № 169373 ot 15 marta 2017.

28. *Antonovich V.V., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Balin Yu.S., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Kokhanenko G.P., Novoselov M.M., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chernov D.G., Smargunov V.P., Yausheva E.P., Paris J.-D., Ancellet G., Law K.S., Pelon J., Machida T., Sasakawa M*. Station for the comprehensive monitoring of the atmosphere at Fonovaya Observatory, West Siberia: current status and future needs // Proceedings of SPIE. 2018, Vol. 10833. CID: 10833 7Z. [10833-189]. DOI: 10.1117/12.2504388.

УДК 551.510.42 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-61-69

КАРБОНОВЫЕ ПОЛИГОНЫ ИОА СО РАН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ. ЧАСТЬ II

В.В. Антонович[1], О.Ю. Антохина[1], П.Н. Антохин[1], В.Г. Аршинова[1], М.Ю. Аршинов[1], Б.Д. Белан[1], С.Б. Белан[1], Д.К. Давыдов[1], Г.А. Ивлев[1], А.В. Козлов[1], Ш.Ш. Максютов[2], Т. Мачида[2], Д.А. Пестунов[1], И.В. Пташник[1], Т.М. Рассказчикова[1], Д.Е. Савкин[1], Сасакава[2], Д.В. Симоненков[1], Т.К. Скляднева[1], Г.Н. Толмачев[1], А.В. Фофонов[1]

[1]Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, РФ
[2]Национальный институту исследования окружающей среды, Тсукуба, Япония
E-mail: bbd@iao.ru

Во второй части работы дано описание сети станций мониторинга парниковых газов, созданной в Западной Сибири на территории Алтайского края, Омской, Томской, Тюменской и Челябинской областей, Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов. Приводятся некоторые результаты многолетнего мониторинга парниковых газов на территории Западной Сибири.
Ключевые слова: атмосфера, станция, парниковые газы.

Поступила в редакцию 24.08.2022. После доработки: 27.11.2022.

Введение. В первой части работы была описана мониторинговая система ИОА СО РАН по контролю за концентрацией парниковых газов, развернутая в Западной Сибири. Она состоит из 3 постов и 2 стационаров. Для такого обширного региона, как Западносибирский, который к тому же характеризуется значительным ландшафтным разнообразием, этого совершенно недостаточно. Для повышения репрезентативности наблюдательной сети необходимо было расширить территорию, охваченную регулярными измерениями. Это было выполнено при создании Российско-японской сети мониторинга парниковых газов JR-STATION. Она охватывает почти все территорию Западной Сибири и была создана в рамках международного российско-японского сотрудничества между Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИАО СО РАН) и Национальным институтом исследований окружающей среды (NIES, г. Цукуба, Япония).

Описание сети. Отбор проб воздуха ведется, как правило, с двух высотных уровней, причем верхний ограничен фактической высотой мачты, а нижний всегда располагается над верхним срезом окружающей древесной растительности (от 15 до 40 м). По системе трубок и переключающих клапанов воздух, предварительно осушенный, непрерывно подается к газоанализаторам согласно установленному графику. Измерения концентраций проводятся ежечасно для каждого из высотных уровней, а два раза в сутки производится процедура калибровки по трем ПГС. В целях экономии дорогостоящих «стандартов» также осуществляется ежечасная калибровка по опорной газовой смеси, которая периодически закачивается в 2 баллона из окружающей атмосферы, представляя, таким образом, дополнительный возобновляемый «стандарт».

Схема расположения станций по территории Западной Сибири и внешний вид используемых для измерений башен показан на рис. 1. Все посты оснащены однотипным оборудованием. Координаты и технические характеристики его показаны в табл. 1, 2.

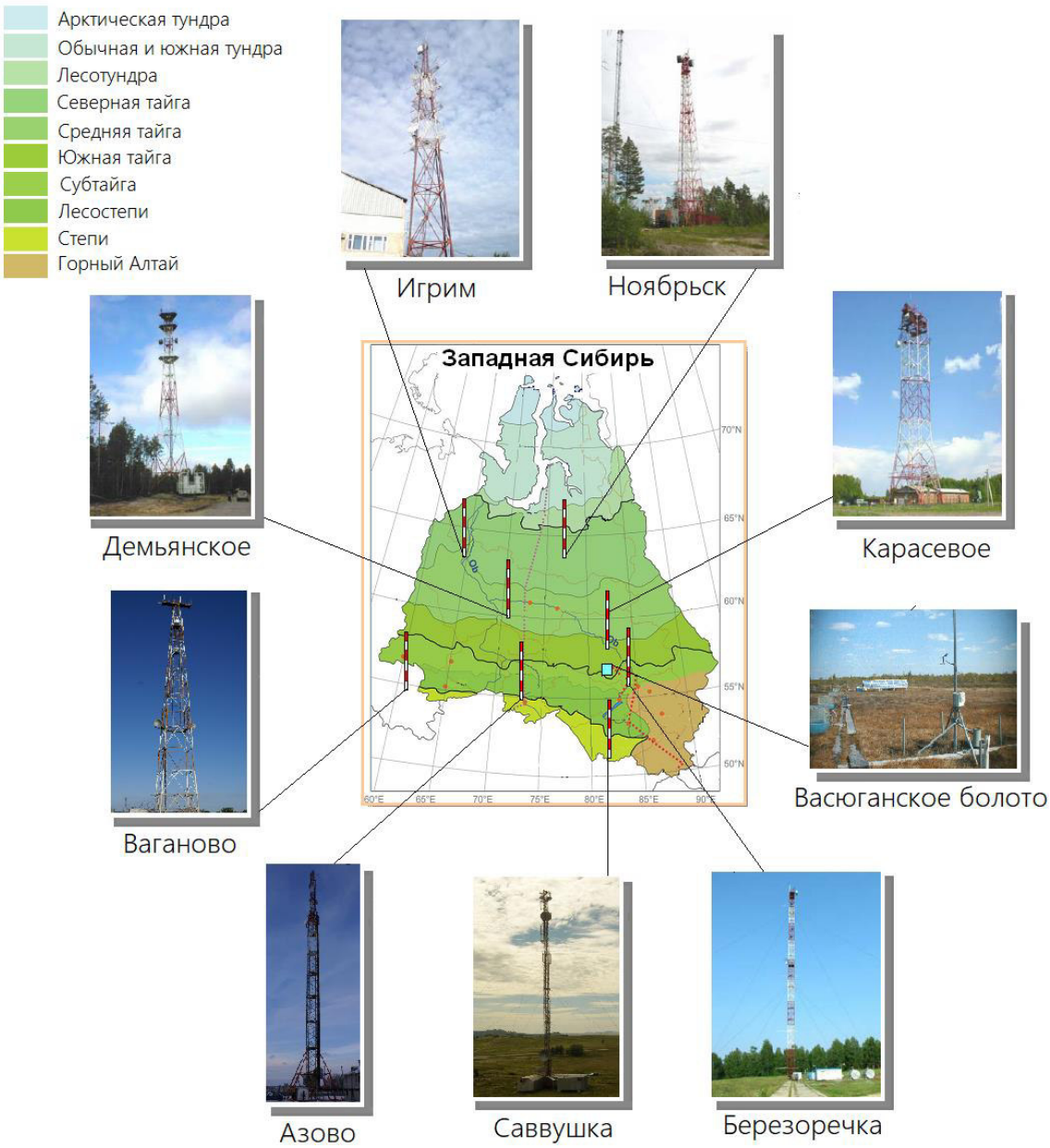


Рис.1. Расположение постов парниковых газов на территории Западной Сибири
Fig. 1. Location of greenhouse gas stations in Western Siberia

Таблица 1. Координаты постов Российско-японской сети JR-STATION

Пункт	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Высота, м н.у.м.	Высота уровней отбора проб, м	Начало ряда
Березоречка, Томская обл.	56°08′48″	84°19′50″	150	5, 20, 40, 80	2002
Карасевое, Томская обл.	58°14′47″	82°25′16″	50	35, 67	2004
Игрим, ХМАО	63°11′30″	64°24′48″	25	24, 47	2004-2013

Продолжение таблицы 1

Пункт	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Высота, м н.у.м.	Высота уровней отбора проб, м	Начало ряда
Демьянское, Тюменская обл.	59°4′31″	70°52′15″	75	45, 63	2006
Ноябрьск, ЯНАО	63°26′28″	75°46′22″	100	21, 43	2006
Саввушка, Алтайский край	51°19′49″	82°07′67″	400	27, 52	2006-2014
Азово, Омская обл.	54°42′19″	73°01′45″	100	29, 50	2007
Ваганово, Челябинская обл.	54°29′50″	62°19′29″	200	42, 85	2008

Таблица 2 Технические характеристики станций сети JR-STATION

Блок	Прибор/датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погрешность
Метеоблок	Vaisala HMP45D	t,°C U,%	-40...+60 0...100	±0,2 °C ±2%
	Young Model 05103	dd, град V, м/с	0...360 0...60	±3° ±0,3 м/с
	Young Model 52202	Интенсивность и количество осадков	0…50 мм/ч	±2% (<25 мм/ч), ±3% (>25 мм/ч)
	Omega PX2760	P, гПа	800...1100	±0.25%
Блок газоанализа	LI-COR LI-820	CO_2, млн$^{-1}$	0...1000	< 0,2* млн$^{-1}$
	Модифицированный датчик Figaro TGS-2611	CH_4, млн$^{-1}$	1…10	< 0,007* млн$^{-1}$
	Picarro G2301**	CO_2, млн$^{-1}$ CH_4, млн$^{-1}$ H_2O, млн$^{-1}$	0...1000 0...20 0...70000	< 0,07 млн$^{-1}$ <0,0005 млн$^{-1}$ < 80 млн$^{-1}$
	Picarro G2401***	CO_2, млн$^{-1}$ CH_4, млн$^{-1}$ CO, млн$^{-1}$ H_2O, млн$^{-1}$	0...1000 0...20 0...1 0...70000	< 0,05 млн$^{-1}$ <0,001 млн$^{-1}$ <0,015 млн$^{-1}$ < 30 млн$^{-1}$
Радиационный блок	Kipp&Zonen CM3	λ, мкм Q, Вт/м^2	0,305...2,8 0...2000	< ± 2%
	Kipp&Zonen PQS1	λ, мкм ФАР, мкмоль м$^{-2}$ с$^{-1}$	0,4...0,7	< ± 2%

* при калибровке поверочными газовыми смесями (ПГС)
** на станциях Демьянское и Ноябрьск (с 2016 г.)
*** на станции Карасевое (с 2015 г.)

Комплекс для исследования потоков парниковых газов на границе почва-аатмосферв (Васюганское болото). Две измерительные площадки расположены на Иксинском болоте, представляющем собой северо-восточный отрог Большого Васюганского болота. Примерно в 16 км от с. Плотниково Бакчарского района Томской области, на стационаре Института почвоведения и агрохимии СО РАН (56°51’29” N, 82°50’91” E). Площадка 1 в грядово-мочажинном комплексе нетронутого болота. Площадка 2 находится на краю нарушенного (мелиорированного в советское время) болота. На обеих площадках были установлены одинаковые измерительные комплексы. В 2009 году комплекс на площадке 2 был уничтожен и восстановлен в 2019 году.

Измерительный комплекс на Васюганском болоте (рис. 2) состоит из 12 автоматических камер, установленных на различных растительных сообществах болотной экосистемы. Его технические характеристики приведены в табл. 3. В составе растительного покрова на обеих площадках присутствуют низкорослые сосны (*Pinus sylvestris f. willkommii*) высотой 50 см. Травяно-кустарничковый ярус представлен багульником (*Ledumpalustre L.*) и кочками пушицы (Eriophorum vaginatum Lu), встречается клюква (*Oxycoccus microcarpus Turcz.*). Моховой покров сплошной, состоит в основном из *Sphagnum fuscum Klinggr.* и *Sph. angustifolium C. Jens*.



Рис. 2. Измерительный комплекс, расположенный на Васюганском болоте
Fig. 2. Measuring complex located on the Vasyugan swamp

Таблица 3. Технические характеристики комплексов оборудования для измерения потоков CH_4 и CO_2, установленного на двух площадках Иксинского болота

Блок	Прибор/датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погрешность
Метеоблок	Vaisala HMP45A	t,°C U,%	-40...+60 0...100	±0,2 °C ±2%
	Young Model 05103	dd, град V, м/с	0...360 0...60	±3° ±0,3 м/с
	Young Model 52202	Интенсивность и количество осадков	0…50 мм/ч	±2% (<25 мм/ч), ±3% (>25 мм/ч)

	Omega PX2760	P, гПа	800...1100	±0.25%
	HOBO U20-001-04 (10 шт.)	Уровень воды, м	0…4	±0,03
	Dallas DS1921L-F50	t почвы, °C	-40...+85	±1,0 °C
Блок газо-анализа	LI-COR LI-820	CO_2, млн$^{-1}$	0...1000	< 0,2* млн$^{-1}$
	Модифицированный датчик Figaro TGS-2611	CH_4, млн$^{-1}$	1…10	< 0,007* млн$^{-1}$
Радиацион-ный блок	Kipp&Zonen CMP-21	λ, мкм Q, Вт/м^2	0,285...2,8 0...4000	< ± 2%
	Kipp&Zonen PQS1	λ, мкм ФАР, мкмоль м$^{-2}$ с$^{-1}$	0,4...0,7	< ± 2%
	Eppley Lab. PIR	λ, мкм IR, Вт/м^2	3,5...50 0...700	< ± 3%

* при калибровке поверочными газовыми смесями (ПГС).

Процесс измерения полностью автоматизирован и не требует постоянного вмешательства оператора, что в свою очередь снижает влияние человека, на измерения увеличивая тем самым воспроизводимость результатов и уменьшая погрешность измерений. Результаты работ были опубликованы в [1–13]

Основные результаты мониторинга парниковых газов. Проведенный мониторинг показывает, что на всей территории Западной Сибири наблюдается устойчивый рост концентрации CO_2 и CH_4 и он значительно выше над южными районами. Это хорошо видно из рис. 3, 4.

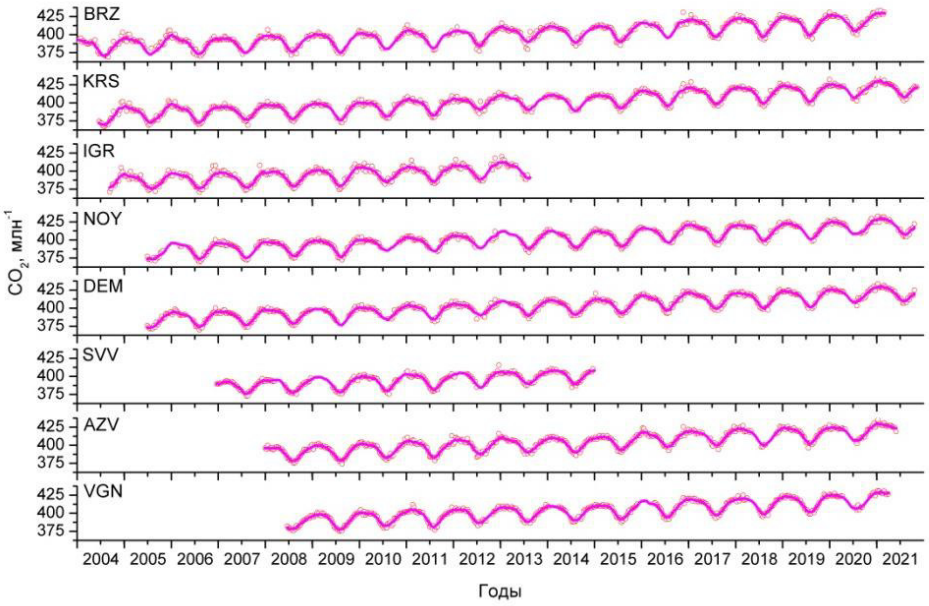


Рис. 3. Многолетний сглаженный ход среднедекадных концентраций углекислого газа в пунктах сети мониторинга на территории Западной Сибири
Fig. 3. Long-term smoothed course of average ten-day concentrations of carbon dioxide at monitoring network points in Western Siberia

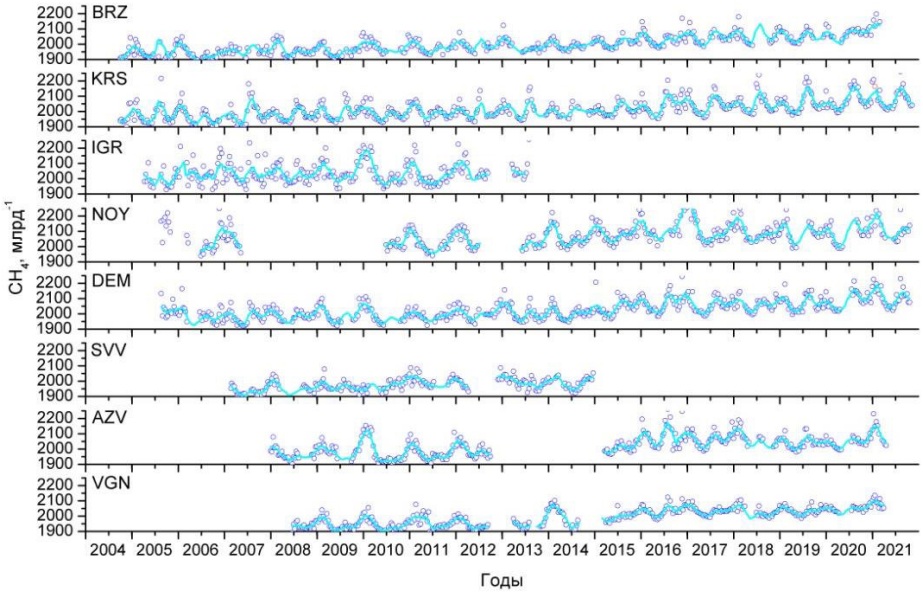


Рис. 4. Многолетний сглаженный ход среднедекадных концентраций метана в пунктах сети мониторинга на территории Западной Сибири

Fig. 4. Long-term smoothed course of mean ten-day methane concentrations at monitoring network points in Western Siberia

Среднее увеличение концентрации углекислого газа в приземной атмосфере по результатам наших измерений и данным из других источников колеблется в пределах 2,2–2,44 млн$^{-1}$ в год (рис. 3). Следует также отметить высокую изменчивость атмосферного содержания CO_2 в вегетационный период года, когда наблюдается суточное дыхание растительности на подстилающей поверхности, что приводит к увеличению СКО измеряемых значений. Напротив, в холодное время высокие концентрации CO_2 в приземной атмосфере варьируются незначительно, за исключением всплеска в начале зимнего отопительного сезона.

В работе [14] отмечается, что глобальные средние концентрации CH_4 увеличивались почти постоянно, начиная с доиндустриальной эпохи до конца XX века. Далее поведение метана стало менее определенным. Между 1990 и 2006 годами наблюдалось общее небольшое снижение глобальных концентраций с повышенной межгодовой изменчивостью – от +16,5 ± 0,9 млрд$^{-1}$/год в 1991 году, до –3,8 ± 1,2 млрд$^{-1}$/год в 2004 году. Однако, по последним наблюдениям, начиная с 2007 года, неустойчивое состояние метана сменилось ростом его содержания в атмосфере. Возможные объяснения подобного процесса включают гипотезы: изменения в глобальных концентраций OH, основного атмосферного стока CH_4; и изменения в эмиссии от таких источников метана, как возделывание риса, болот, сжигание биомассы и ископаемого топлива.

Вышеописанные тенденции в межгодовом поведении метана обнаружены и на сети мониторинга в Западной Сибири (рис. 4). В целом, анализ многолетних данных свидетельствует о наличие роста атмосферных концентраций CH_4 в пределах 6 – 11 млрд$^{-1}$ в год. Отметим также, что в отличие от CO_2 метан показывает наибольшую изменчивость (увеличенные СКО измеряемых значений) в летние и зимние максимумы наблюдаемых концентраций.

Среднегодовые концентрации CO_2 и CH_4, измеряемые обсерваториями ESRL NOAA на горе Мауна Лоа (MLO; 19°32'с.ш.; 155°35' з.д.; Гавайи, США) и мысе Барроу (BRW; 71°19' с.ш.; 156°37' з.д.; Аляска, США) [15, 16] ниже полученных нами, что объясняется не только их географическим расположением в океанической зоне, но и значительной высотой первого пункта (3397 м н.у.м.). Последнее обстоятельство позволяет отнести условия наблюдений обсерватории Мауна Лоа к проводимым вблизи планетарного пограничного слоя Земли, где изменения в поведении малых газовых составляющих атмосферы значительно сглажены.

Заключение. Для проведения мониторинга состава воздуха на территории Западной Сибири было создано 3 поста комплексного мониторинга, 8 постов контроля концентрации парниковых газов и 2 стационара измерения потоков парниковых газов на границе почва-атмосфера.

Проведенный с их помощью многолетний мониторинг показал, что, в зависимости от района увеличение концентрации углекислого газа в приземном слое воздуха составляет 2,17–2,44 млн$^{-1}$ в год, рост содержания метана – 6–11 млрд$^{-1}$ в год. Это превышает средние темпы роста содержания этих газов по планете [17].

Наименьшая изменчивость характерна для N_2O. В среднем рост концентрации происходит со скоростью 0,80 млрд$^{-1}$ /год, что соответствует среднему тренду по планете [17].

Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН, проект ВИП ГЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barkley M.P., Monks P.S., Hewitt A.J., Machida T., Desai A., Vinnichenko N., Nakazawa T., Arshinov M.Yu, Fedoseev N., Watai T.* Assessing the near surface sensitivity of SCIAMACHY atmospheric CO2 retrieved using (FSI) WFM-DOAS // Atmos. Chem. Phys.., 2007, Vol. 7, N 13, P. 3597–3619.

2. *Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davidov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y., Maksyutov S.* Continuous Measurement of Methane Concentration using 9-tower Network over Siberia // Tellus B. 2010. Vol. 62. № 5. P. 403–416.

3. *Watai T., Machida T., Shimoyama K., Krasnov O., Yamamoto M., Inoue G.* Development of an Atmospheric Carbon Dioxide Standard Gas Saving System and Its Application to a Measurement at a Site in the West Siberian Forest // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2010. Vol. 27. № 5. P. 843–855.

4. *Machida T., Sasakawa M., Shimoyama K., Arshinov M, Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Fedoseev N., Tsuda N., Mitin S., Suto H., Katsumata K., Tsuda N., Nakazawa T., Maksyutov S.* Temporal and spatial distributions of atmospheric greenhouse gases over Siberia (на японском языке) // Low Temperature Science. 2010. Vol. 68. P. 9–19.

5. *Sasakawa M. , Ito A., Machida T., Tsuda N. , Niwa Y. , Davydov D. , Fofonov A. , Arshinov M.* Annual variation of methane emissions from forested bogs in West Siberia (2005–2009): a case of high CH_4 and precipitation rate in the summer of 2007 // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2010. Vol. 10. N 11. P. 27759–27776.

6. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофонов А.В., Бабченко С.В., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh., Sasakawa M., Shimoyama K.* Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 12. С. 1051–1061.

7. *Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y., Davydov D., Fofonov A., and Arshinov M.* Annual variation of CH4 emissions from the middle taiga in West Siberian Lowland (2005-2009): a case of high CH_4 flux and precipitation rate in the summer of 2007 // Tellus B. 2012. Vol. 64. 17514. DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.17514.

8. *Saeki T., Maksyutov S., M. Sasakawa, Machida T., Arshinov M., Tans P., Conway T. J., Saito M., Valsala V., Oda T., Andres R. J., Belikov D.* Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling

constrained by aircraft and tower CO_2 measurements // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. Vol. 118. Is. 2. P. 1100–1122. DOI: 10.1002/jgrd.50127.

9. *Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O.* Aircraft and tower measurements of CO_2 concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011 // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. Vol. 118. Is. 16. P. 9489–9498. DOI: 10.1002/jgrd.50755.

10. *Berchet A., Pison I., Chevallier F., Paris J.-D., Bousquet P., Bonne J.-L., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Cressot C., Davydov D.K., Dlugokencky E.J., Fofonov A.V., Galanin A., Lavrič J., Machida T., Parker R., Sasakawa M., Spahni R., Stocker B.D., Winderlich J.* Natural and anthropogenic methane fluxes in Eurasia: a mesoscale quantification by generalized atmospheric inversion // Biogeosciences. 2015. Vol. 12. N 18. P. 5393–5414.

11. *Ono A., Hayashida S., Sugita T., Machida T., Sasakawa M., and Arshinov M.* Comparison of GOSAT SWIR and aircraft measurements of XCH4 over West Siberia // Scientific Online Letters on the Atmosphere. 2015. Vol. 11. № 12. P. 160−164.

12. *Kim J., Kim H.M., Cho C.-H., Boo K.-O., Jacobson A.R., Sasakawa M., Machida T., Arshinov M., and Fedoseev N.* Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO_2 flux, Atmos. Chem. Phys. Discuss. DOI:10.5194/acp-2015-875, in review, 2016.

13. *Sasakawa M., Machida T., Ishijima K., Arshinov M., Patra P.K., Ito A., Aoki S., Petrov V.* Temporal characteristics of CH_4 vertical profiles observed in the West Siberian Lowland over Surgut from 1993 to 2015 and Novosibirsk from 1997 to 2015 // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2017. Vol. 122. N 20. P. 11261–11273.

14. *Belikov D., Arshinov M., Belan B., Davydov D., Fofonov A., Sasakawa Motoki, Machida Toshinobu*. Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO_2 and CH_4 at tower network in Siberia during 2005–2016 // Atmosphere. 2019. Vol. 10. N 11. 689; https://doi.org/10.3390/atmos10110689.

15. *O'Shea S.J., Bauguitte S.J.-B., Gallagher M.W., Lowry D., Percival C.J.* Development of a cavity-enhanced absorption spectrometer for airborne measurements of CH_4 and CO_2 // Atmos. Meas. Tech. 2013. № 6. P. 1095–1109. DOI:10.5194/atm-6-1095-2013.

16.URL:http://www.esrl.noaa.gov/gmd.

17. WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 17. 25 October 2021. 8 p.

CARBONIC POLYGONS OF THE IOA SB RAS FOR STUDYING THE DYNAMICS OF GREENHOUSE GASES IN THE ATMOSPHERE. PART II

V.V. Antonovich[1], O.Yu. Antokhina[1], P.N. Antokhin[1], V.G. Arshinova[1], M.Yu. Arshinov[1], B.D. Belan[1], S.B. Belan[1], D.K. Davydov[1], G.A. Ivlev[1], A.V. Kozlov[1], Sh.Sh. Maksyutov[2], T. Machida[2], D.A. Pestunov[1], I.V. Ptashnik[1], T.M. Rasskazchikova[1], D.E. Savkin[1], Sasakawa[2], D.V. Simonenkov[1], T.K. Sklyadneva[1], G.N. Tolmachev1, A.V. Fofonov[1]

[1]Institute of Atmospheric Optics named after V.E. Zuev, SB of RAS, Tomsk, RF
[2]National Institute for Environmental Research, Tsukuba, Japan

The second part of the paper describes the network of greenhouse gas monitoring stations, set up in Western Siberia on the territory of the Altai Territory, Omsk, Tomsk, Tyumen and Chelyabinsk regions, Khanty-Mansiysk and Yamalo-Nenets Autonomous Districts. Some results of long-term monitoring of greenhouse gases in Western Siberia are presented.
Keywords: atmosphere, station, greenhouse gases.

REFERENCES

1. *Barkley M.P., Monks P.S., Hewitt A.J., Machida T., Desai A., Vinnichenko N., Nakazawa T., Arshinov M.Yu, Fedoseev N., Watai T.* Assessing the near surface sensitivity of SCIAMACHY atmospheric CO2 retrieved using (FSI) WFM-DOAS // Atmos. Chem. Phys.., 2007, Vol. 7, N 13, P. 3597–3619.

2. *Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davidov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y., Maksyutov S.* Continuous Measurement of Methane Concentration using 9-tower Network over Siberia // Tellus B. 2010. Vol. 62. № 5. P. 403–416.

3. *Watai T., Machida T., Shimoyama K., Krasnov O., Yamamoto M., Inoue G.* Development of an Atmospheric Carbon Dioxide Standard Gas Saving System and Its Application to a Measurement at a Site in the West Siberian Forest // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2010. Vol. 27. № 5. P. 843–855.

4. *Machida T., Sasakawa M., Shimoyama K., Arshinov M, Davydov D., Fofonov A., Krasnov O., Fedoseev N., Tsuda N., Mitin S., Suto H., Katsumata K., Tsuda N., Nakazawa T., Maksyutov S.* Temporal and spatial distributions of atmospheric greenhouse gases over Siberia (на японском языке) // Low Temperature Science. 2010. Vol. 68. P. 9–19.

5. *Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y. , Davydov D. , Fofonov A. , Arshinov M.* Annual variation of methane emissions from forested bogs in West Siberia (2005–2009): a case of high CH_4 and precipitation rate in the summer of 2007 // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2010. Vol. 10. N 11. P. 27759–27776.

6. *Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Krekov G.M., Fofonov A.V., Babchenko S.V., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh., and Sasakaw.* Dinamika vertikal'nogo raspredeleniya parnikovyh gazov v atmosfere (Dynamics of the vertical distribution of greenho use gases in the atmosphere). *Atmospheric and oceanic optics.* 2012, Vol. 25, No. 12, pp. 1051–1061.

7. *Sasakawa M., Ito A., Machida T., Tsuda N., Niwa Y., Davydov D., Fofonov A., and Arshinov M.* Annual variation of CH4 emissions from the middle taiga in West Siberian Lowland (2005-2009): a case of high CH_4 flux and precipitation rate in the summer of 2007 // Tellus B. 2012. Vol. 64. 17514. DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.17514.

8. *Saeki T., Maksyutov S., M. Sasakawa, Machida T., Arshinov M., Tans P., Conway T. J., Saito M., Valsala V., Oda T., Andres R. J., Belikov D.* Carbon flux estimation for Siberia by inverse modeling constrained by aircraft and tower CO_2 measurements // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. Vol. 118. Is. 2. P. 1100-1122. DOI: 10.1002/jgrd.50127.

9. *Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O.* Aircraft and tower measurements of CO_2 concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011 // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. Vol. 118. Is. 16. P. 9489–9498. DOI: 10.1002/jgrd.50755.

10. *Berchet A., Pison I., Chevallier F., Paris J.-D., Bousquet P., Bonne J.-L., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Cressot C., Davydov D.K., Dlugokencky E.J., Fofonov A.V., Galanin A., Lavrič J., Machida T., Parker R., Sasakawa M., Spahni R., Stocker B.D., Winderlich J.* Natural and anthropogenic methane fluxes in Eurasia: a meso-scale quantification by generalized atmospheric inversion // Biogeosciences. 2015. Vol. 12. N 18. P. 5393–5414.

11. *Ono A., Hayashida S., Sugita T., Machida T., Sasakawa M., and Arshinov M.* Comparison of GOSAT SWIR and aircraft measurements of XCH4 over West Siberia // Scientific Online Letters on the Atmosphere. 2015. Vol. 11. № 12. P. 160−164.

12. *Kim J., Kim H. M., Cho C.-H., Boo K.-O., Jacobson A. R., Sasakawa M., Machida T., Arshinov M., and Fedoseev N.* Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO_2 flux, Atmos. Chem. Phys. Discuss. DOI:10.5194/acp-2015-875, in review, 2016.

13. *Sasakawa M., Machida T., Ishijima K., Arshinov M., Patra P. K., Ito A., Aoki S., Petrov V.* Temporal characteristics of CH_4 vertical profiles observed in the West Siberian Lowland over Surgut from 1993 to 2015 and Novosibirsk from 1997 to 2015 // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2017. Vol. 122. N 20. P. 11261–11273.

14. *Belikov D., Arshinov M., Belan B., Davydov D., Fofonov A. Sasakawa Motoki, Machida Toshinobu.* Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO_2 and CH_4 at tower network in Siberia during 2005–2016 // Atmosphere. 2019. Vol. 10. N 11. 689; https://doi.org/10.3390/atmos10110689.

15. *O'Shea S.J., Bauguitte S.J.-B., Gallagher M.W., Lowry D., Percival C.J.* Development of a cavity-enhanced absorption spectrometer for airborne measurements of CH_4 and CO_2 // Atmos. Meas. Tech. 2013. № 6. P. 1095–1109. DOI:10.5194/atm-6-1095-2013.

16. URL:http://www.esrl.noaa.gov/gmd.

17. WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 17. 25 October 2021. 8 p.

УДК 57.08+573.7 DOI:10.33075/2220-5861-2022-4-70-77

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ НАГРУЗКИ НА МОРСКУЮ МИКРОБИОТУ

П.В. Гайский[1], С.А. Шоларь[1], О.А. Степанова[2]

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

Создана и апробирована лабораторная установка для изучения воздействия УФ нагрузки на представителей морской микробиоты. В основе установки – экранированный термостатный короб с УФ излучателями (UV-A, 316÷365 нм, 3 Вт) и емкостями (опыт и контроль). С помощью установки и лабораторного измерительного комплекса с гидрохимическими датчиками, а также при осуществлении регулярного контроля оптических характеристик были проведены эксперименты по влиянию заданного УФ излучения на альгологически чистую культуру морской микроводоросли *Tetraselmis viridis*. В ходе экспериментов зафиксировано различие в характеристиках между опытными и контрольными образцами морской микробиоты.
Ключевые слова: лабораторная установка, ультрафиолетовое излучение, УФ нагрузка, морская микробиота, культура микроводорослей.

Поступила в редакцию: 10.09.2022. После доработки: 11.10.2022.

Введение. По данным литературы известно, что вторая половина XX века характеризовалась глобальным антропогенным прессом на атмосферу нашей Планеты, что сопровождалось множеством изменений в природе, в т.ч. и нарушением озонового слоя с резким повышением доли ультрафиолетового (УФ) излучения в спектре солнечной радиации, достигающей поверхности Земли [1–6]. При этом открытые водоемы и их обитатели в первую очередь оказывались подвержены воздействию увеличенной УФ нагрузки [7]. Имевшиеся в конце XX века данные свидетельствовали, что прогнозируемое возрастание УФ излучения может иметь существенные негативные эффекты в морской среде, что в свою очередь указывало на необходимость проведения научных исследований в области гидросферы и ее обитателей, как в полевых условиях, так и в лабораторных экспериментах [8].

В начале лета 2022 г., ученый Цин-Бин Лу из Университета Ватерлоо в Канаде сделал важное сообщение о существовании над тропиками озоновой дыры, которая в 7 раз больше той, что была открыта в Антарктике в 1985 г. [9]. По его заключению эта новая огромная озоновая дыра располагается примерно в 24 километрах над земной поверхностью. По мнению ученых, в связи с появлением новой огромной озоновой дыры над тропиками могут пострадать миллионы людей, а также местные экосистемы, морская флора и фауна, сельское хозяйство.

Таким образом, в свете современных тенденций изменения климата, задача изучения влияния УФ нагрузки с разной интенсивностью на живые объекты, в т.ч. на представителей морской биоты, а особенно на фитопланктон, как на производителя кислорода и первичного органического углерода в гидросфере, не теряет своей актуальности и остроты заинтересованности исследователей.

Ранее путем экспериментов нами были выполнены исследования влияния УФ нагрузки (коротковолновой части спектра УФ излучения) на биоэнергетику (теплопродукцию), численность, морфологию, биологическую продукцию, сезонную чувствительность к УФ и на другие характеристики черноморского микропланктона на примере его разных размерных фракций, а также на

культуру сине-зеленой микроводоросли *Spirulina platensis* [10–12]. В опубликованных статьях представлено описание выполненных экспериментов с использованием бактерицидной лампы БУФ-30 с постоянной мощностью (270 мкВт/см^2) и длиной волны 254–320 нм. В ходе исследований была установлена высокая устойчивость к воздействию УФ нагрузки и способность к восстановлению у микроводоросли *Spirulina platensis*. Однако у фракции морского бактериопланктона после воздействия УФ радиации фиксировали снижение численности бактериальных представителей, угнетение процессов метаболизма и жизнеспособности сообществ микроорганизмов вплоть до полной их гибели.

По данным литературы и в соответствии с полученными нами ранее результатами [7, 8, 10–12] можно отметить, что в небольших дозах и при определенной длине волны УФ излучение положительно влияет на биологическую продуктивность морской микробиоты. Длительное воздействие, особенно коротковолновой части спектра УФ излучения, угнетает жизнеспособность представителей морской микробиоты.

С учетом актуальности и недостаточной изученности проблемы исследования влияния УФ излучения на морскую микробиоту, нашей целью явились разработка и апробация лабораторной установки, позволяющей создавать УФ нагрузку на представителей морского фитопланктона на примере культур микроводорослей.

Материалы и методы. В качестве морской микроводоросли, подвергавшейся воздействию УФ нагрузки, использовали жидкую, альгологически чистую культуру *Tetraselmis viridis*, полученную в 2021 г. из коллекции живых культур микроводорослей отдела экологической физиологии водорослей ФИЦ “ИнБЮМ А.О. Ковалевского РАН”. Культура микроводоросли поддерживалась в стабилизирующей среде Гольдберга в лабораторных условиях на базе Института природно-технических систем.

Влияние УФ нагрузки в экспериментах определяли с использованием биологических и биофизических методов:

1. по изменению чувствительности микроводоросли к вирусному лизису с использованием штамма альговируса TvVSI-1 (из авторской коллекции альговирусов);

2. по изменению оптической плотности *D*, определяемой на спектрофотометре МС 122А [13].

Также проводили измерения гидрохимических показателей, что будет описано ниже.

Результаты и обсуждение. В основе созданной лабораторной установки предусмотрен экранированный термостатный короб с открытым для попадания естественного света верхом.

Внутри короба размещены две цилиндрические прозрачные емкости объемом по 1,8 л, предназначенные для опыта и контроля. В части, где происходит облучение (опыт) изучаемой микробиоты – культуры микроводоросли, по бокам емкости вдоль всей длины размещены две продольные УФ лампы (UV-A, 316÷365 нм) с суммарной излучающей мощностью до 3 Вт. Пространства для опыта и контроля разделены отражающим УФ излучение экраном. Схема разработанной лабораторной установки представлена на рис. 1.

Первые эксперименты проводились при естественном комнатном освещении. В дальнейшем после выполненной апробации созданной лабораторной установки будут воспроизведены и некоторые модификации, в частности в устройство будет введено искусственное освещении (лампа накаливания).

При апробации разработанной лабораторной установки в проведенных экспериментах использовалось по 1,0 л подготовленной культуры микроводоросли *Tetraselmis viridis* в стадии логарифмической фазы роста. Для биологических и биофизических исследований образцов из опыта и контроля проводили регулярный (через 4 ч, 24 ч, 48 ч и 72 ч) отбор проб по 40 мл.

В качестве контроля гидрохимических показателей (измерений температуры, освещенности, щелочности (pH) и концентрации растворенного кислорода) использовались погружные датчики лабораторного комплекса «Среда» [14].

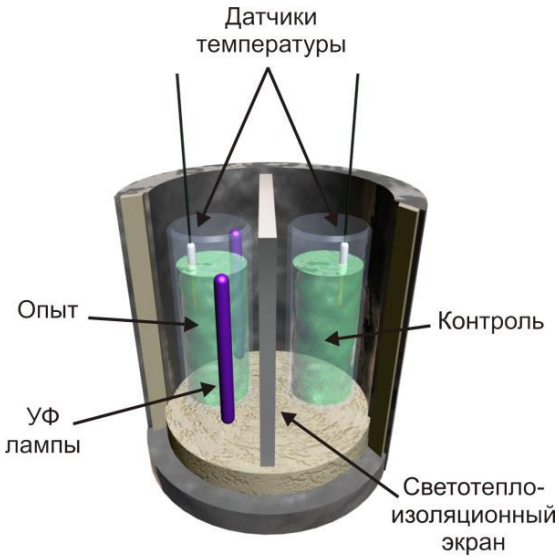


Рис. 1. Схематическое изображение лабораторной установки для изучения влияния УФ нагрузки на морскую микробиоту
Fig. 1. Schematic of a laboratory installation to study the effect of UV load on the marine microbiota

Эксперимент длился 6 суток. Наиболее интересные и достоверные с точки зрения методики проведения опытов результаты были получены в первые сутки. На рис. 2 представлены графики контролируемых с помощью погружных датчиков параметров в опыте и контроле. Внутреннее барботирование и перемешивание не осуществлялось. Единственным фактором «вторжения» в водные среды экспериментальных емкостей являлась перестановка химических датчиков (вследствие их невозможной одновременной работы в одной токопроводящей среде) и забор проб. Показания записывались в непрерывном режиме, но в результатах обработки использовались только установившиеся значения.

На рис. 2 представлены первичные графики изменений температуры, pH (щелочности) и O_2 (растворенного кислорода) в течение первых пяти часов эксперимента в условиях почасовой замены датчиков pH и O_2 в опыте и контроле с промежуточной промывкой и протиркой (просушкой).

На рис. 3 представлены графики приведенных относительных изменений температуры, pH (щелочности) и O_2 (растворенного кислорода) в течение первых двух суток в опыте и контроле до выключения воздействия УФ. Действие ламп УФ сказывается на нагреве жидкой биологической системы в опыте на $1{,}5^0$C в сравнении с биологической системой в контроле. После выключения ламп температура выравнивается, pH со временем падает, причем медленнее в опыте и сохраняет значение выше на 0,15 о.е. Растворенный кислород в опыте постепенно снижается, а в контроле сначала удерживается, а потом тоже идет на спад.

В отобранных пробах через 24 ч эксперимента из опыта (рост и развитие культуры микроводоросли под воздействием УФ нагрузки) и контроля (без УФ влияния) можно наблюдать по рис. 4

более интенсивное выделение O_2 в опыте (пузырьки газа). Возможно, что влияние УФ излучения заданного диапазона и мощности, может играть на данном этапе эксперимента (24 ч) положительную роль в биологической продуктивности облучаемой культуры, что проявилось усилением выработки O_2.

Таким образом, по результатам эксперимента были получены данные, свидетельствующие об изменениях на уровне биохимических показателей в изучаемых биологических системах. Биологические системы, как уже указывалось ранее, были использованы в виде представителей фитопланктона, а именно в виде растущей и развивающейся альгологически чистой культуры микроводоросли в опыте (с УФ нагрузкой) по сравнению с контролем (отсутствие воздействия УФ).

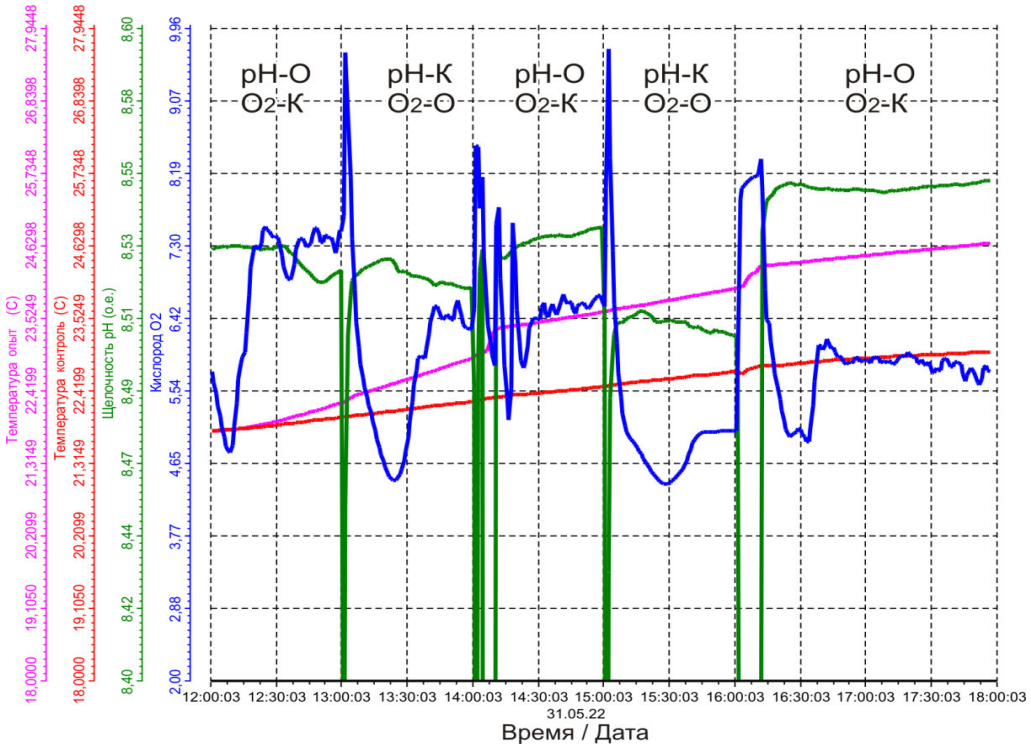


Рис. 2. Первичные графики изменений температуры, pH и растворенного кислорода в опыте (О) и контроле (К) в первые 5 часов эксперимента
Fig. 2. Primary plots of changes in temperature, pH and dissolved oxygen in the test (O) and control (K) in the first 5 hours of the experiment

Оптическую плотность культуры микроводоросли в контроле и опыте – *D* определяли на спектрофотометре. Измерения проводили с помощью спектрофотометра МС 122А в кювете 1 см. Оптическую плотность рассчитывали по формуле: $D = -lg(T)$, где T – величина пропускания, определяемая на МС 122А при длине волны 750 нм, абсолютная погрешность при измерении величины пропускания не превышала 1%.

Для измерений оптической плотности *D* обычно производили отбор проб раз в сутки. Первый отбор проб был выполнен спустя 4 ч после начала эксперимента. Было выявлено, что плотность в контроле и опыте снизилась по сравнению с первоначальными данными (до начала эксперимента). Причем в опыте величина *D* была меньше, чем в контроле. Спустя 28 ч после начала эксперимента отмечалось, что значение *D* выросло и в опыте и в контроле, а через 52 ч фиксировалось его снижение. Таким образом, наблюдалось «волнообразное» изменение оптической плотности. Эти

первые результаты являются предварительными и нуждаются в дальнейшем уточнении и осмыслении с учетом результатов биологических тестов и биохимических характеристик.

На рис. 5 представлен график изменений оптической плотности *D* в опыте и контроле в первые двое суток эксперимента до выключения воздействия УФ.

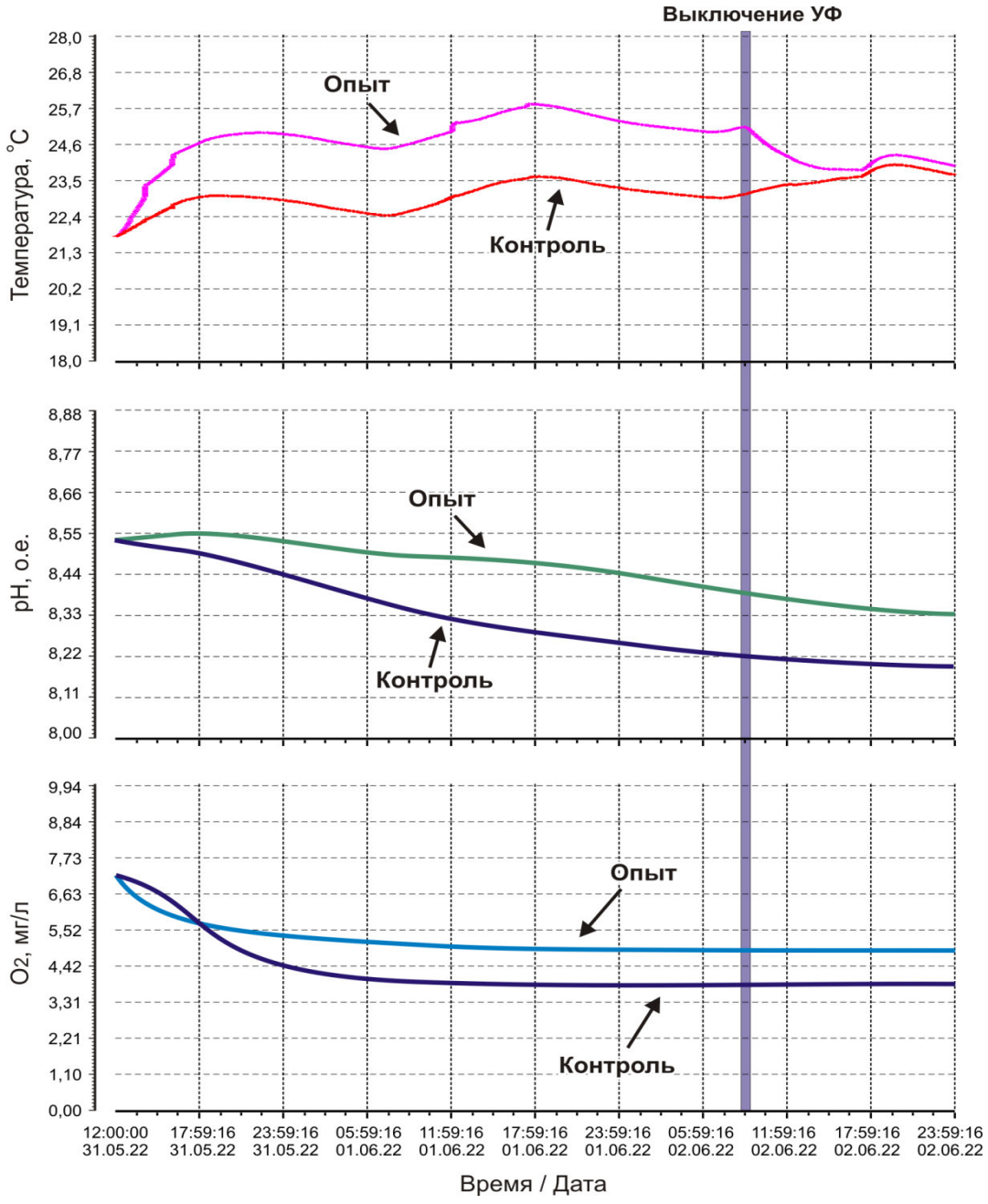


Рис. 3. Графики относительных изменений температуры, pH и растворенного кислорода в опыте и контроле в первые двое суток эксперимента до выключения воздействия УФ
Fig. 3. Plots of the relative changes in temperature, pH and dissolved oxygen in the test and control in the first two days of the experiment until the UV exposure is turned off

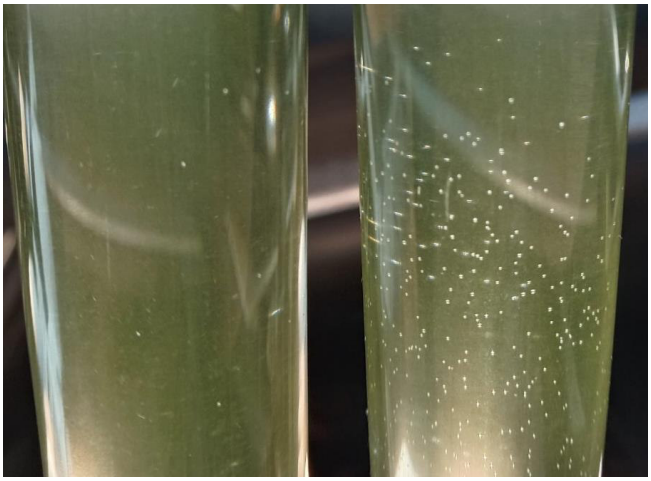


Рис. 4. Фотографии отобранных через 24 ч после начала эксперимента проб культуры микроводоросли *Tetraselmis viridis* из контроля (слева) и опыта (справа)
Fig. 4. Photographs of *Tetraselmis viridis* microalgae culture samples taken 24 hours after the start of the experiment from the control (left) and experiment (right)

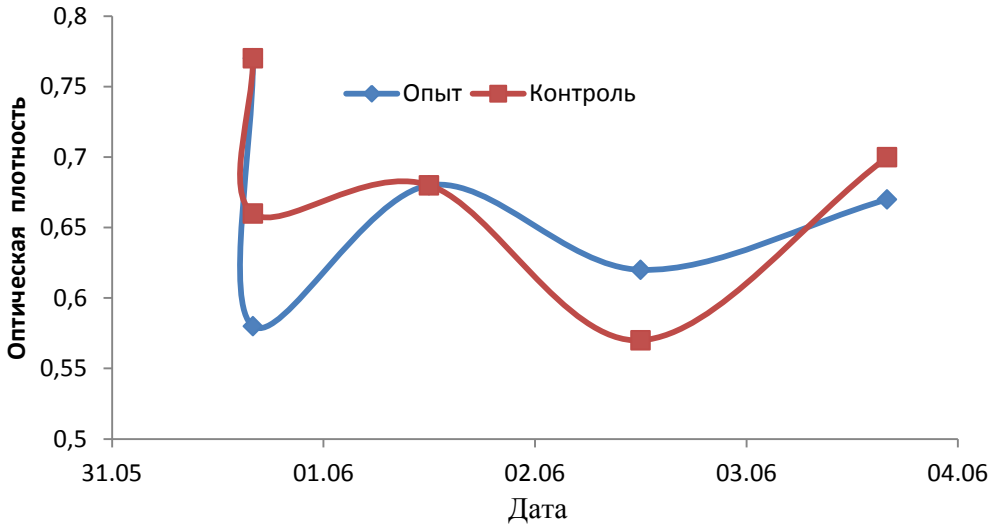


Рис. 5. Графики изменений оптической плотности *D* в опыте и контроле в первые двое суток эксперимента до выключения воздействия УФ
Fig. 5. Graphs of changes in optical density D in the experiment and control in the first two days of the experiment until the UV exposure was turned off

Заключение. В ответ на актуальные запросы нашего времени, вызванные необходимостью проведения полевых исследований и лабораторных экспериментов по изучению влияния УФ излучения в разных участках спектра и с разной продолжительностью воздействия, была разработана и апробирована лабораторная установка по воздействию УФ нагрузки на морскую микробиоту. В созданной лабораторной установке предусмотрено наличие опыта и контроля.

Полученные результаты выполненных экспериментов, свидетельствовали об ответных реакциях культуры микроводоросли *Tetraselmis viridis* на воздействие УФ нагрузки с используемыми параметрами длины волны (UV-A,

316÷365 нм) и суммарной излучающей мощностью применяемых двух продольных УФ ламп 3 Вт.

Было зафиксировано различие в характеристиках между опытными и контрольными образцами морской микробиоты – культуры микроводоросли – по чувствительности к вирусному лизису и по оптической плотности *D*, определяемой на спектрофотометре МС 122А. Также были выявлены различия между опытом и контролем в изменении pH и содержания растворенного кислорода в растворах.

Дальнейшие работы в этом направлении исследований с расширением и анализом биологических, биофизических и биохимических показателей, а также с применением в качестве морской микробиоты других видов микроводорослей и суспензий черноморских альговирусов, при модернизации и использовании созданной лабораторной установки будут продолжены.

Работа выполнена по госбюджетной теме ФИЦ МГИ РАН № FNNN-2021-0004 «Океанологические процессы» и № FNNN-2021-0003 «Оперативная океанология», а также по госбюджетной теме ИПТС № госрегистрации 121122300070-9 "Разработка новых средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бреус Т.К.* Биологические эффекты солнечной активности // Природа. 1998, № 2. С. 76–88.

2. *Витинский Ю.И.* Солнечная активность. М.: Наука, 1983. 192 с.

3. *Владимирский Б.М., Тимурьянц Н.А.* Влияние солнечной активности на биосферу-ноосферу (Гелиобиология от А.Л.Чижевского до наших дней). М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. 374 с.

4. *Влияние* солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли / под ред. М.Н. Гневышева, А.И. Оль. М.: Наука, 1971. 260 с.

5. *Гигишвили Г.В., Сергеенко Н.П., Лещенко Л.Н.* Климат верхней атмосферы меняется // Вестник Российской Академии наук. 2000. Т. 70, № 10. С. 929–933.

6. *Demianov G.V., Kaftan V.I., Zubinsky V.I.* Participation of the Central Research Institute of Geodesy, Aerial Surveying and Cartograph Third Baltic Sea Level GPS Campaign / Reports of the Geodetic Institute, 99:4, Kirkkonummi 1999, P. 127–132.

7. *Worrest R.C., Wolniakowski K.U., Scott J.O.* [et al.]. Sensitivity of marine phytoplankton to UV-B radiation: impact upon a model ecosystem // Photochem. and Photobiol. 1981. 33, N 2. P. 223–227.

8. *Ультрафиолетовое* излучение: Официальный научный обзор по воздействию УФ излучения на окружающую среду и состояние здоровья с упоминанием о глобальном истощении озонового слоя / Изд-во "Медицина" по поручению Минздрава и медицинской промышленности РФ. ВОЗ. Женева. 1995. 414 с. https://apps.who.int/iris/handle/10665/143895

9. https://lenta.ru/news/2022/07/08/ozonehole / (дата обращения: 25.07.2022)

10. *Степанова О.А., Шайда В.Г.* Влияние ультрафиолетового излучения на биоэнергетику морского микропланктона // Экология моря. 1999. Вып. 49. С. 52–56.

11. *Баринов Г.В., Степанова О.А., Шайда В.Г., Чубчикова И.Н.* Влияние коротковолновой части спектра ультрафиолетового излучения на биоэнергетические процессы сине-зеленой водоросли *Spirulina platensis* // Экология моря. 2000. Вып. 50. С. 26–28.

12. *Stepanova O.A.* Sensitivity of marine Heterotrophic bacteria to the Influence of Ultraviolet radiation // Hydrobiological journal. 2004. Vol. 40. No 4. P. 60–67.

13. https://solinstruments.by/produkciya/spektrofotometry/mc-122/ (дата обращения: 01.04.2022)

14. *Гайский П.В.* Модернизация электронного блока лабораторного стенда «Среда» // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2019. Вып. 4 (38). С. 5–10.

A LABORATORY SETUP FOR STUDYING THE INFLUENCE OF ULTRAVIOLET LOAD ON MARINE MICROBIOTA

P.V. Gaisky[1], S.A. Sholar[1], O.A. Stepanova[2]

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

A laboratory setup was created and tested to study the effect of UV load on representatives of the marine microbiota. The setup is based on a shielded thermostatic box with UV lamps (UV-A, 316÷365 nm, 3 W) and capacitances (experience and control). Experiments on the effect of the given UV radiation on the algologically pure culture of the marine microalgae *Tetraselmis viridis* were carried out using the setup and a laboratory measuring complex with hydrochemical sensors, as well as regular monitoring of optical characteristics. In the course of experiments, a difference in characteristics between experimental and control samples of the marine microbiota was recorded.
Keywords: laboratory setup, ultra-violet radiation, UV exposure, marine microbiota, microalgae culture.

REFERENCES

1. *Breus T.K.* Biologicheskie effekty solnechnoj aktivnosti (Biological effects of solar activity). *Priroda*, 1998, pp. 76–88.

2. *Vitinskij Yu.I.* Solnechnaya aktivnost (Solar Activity), Moscow: Nauka, 1983, 192 p.

3. *Vladimirskij B.M. and Timur'yanc N.A.* Vliyanie solnechnoj aktivnosti na biosferu-noosferu (Geliobiologiya ot A.L. Chizhevskogo do nashih dnej) (The influence of solar activity on the biosphere-noosphere (Heliobiology from A.L. Chizhevsky to the present day)), Moscow: MNEPU, 2000, 374 p.

4. *Vliyanie* solnechnoj aktivnosti na atmosferu i biosferu Zemli (Influence of solar activity on the atmosphere and biosphere of the Earth) / pod red. M.N. Gnevysheva, A.I.Ol'. Moscow: Nauka, 1971, 260 p.

5. *Gigishvili G.V., Sergeenko N.P., and Leshchenko L.N.* Klimat verhnej atmosfery menyaetsya (The climate of the upper atmosphere is changing). *Vestnik Rossijskoj Akademii nauk,* 2000, Vol. 70, No. 10, pp. 929–933.

6. *Demianov G.V., Kaftan V.I., and Zubinsky V.I* Participation of the Central Research Institute of Geodesy, Aerial Surveying and Cartograph Third Baltic Sea Level GPS Campaign, *Reports of the Finnish Geodetic Institute*, 1999, No. 4, pp. 127–132.

7. *Worrest R.C., Wolniakowski K.U., Scott J.O., Brooker D.L., Thomson B.E., and Dyke H.V.* Sensitivity of marine phytoplankton to UV-B radiation: impact upon a model ecosystem, *Photochem. and Photobiol*, 1981, Vol. 33, No. 2, pp. 223–227.

8. *Ultraviolet* radiation, Geneva: World Health Orgnization, 1994, 242 p.

9. https://lenta.ru/news/2022/07/08/ozonehole (July 25, 2022).

10. *Stepanova O.A. and Shajda V.G.* Vliyanie ul'trafioletovogo izlucheniya na bioener-getiku morskogo mikroplanktona (Influence of ultraviolet radiation on the bioenergetics of marine microplankton). *Ekologiya morya,* 1999, No. 49, pp. 52–56.

11. *Barinov G.V., Stepanova O.A., Shajda V.G., and Chubchikova I.N.* Vliyanie korotkovolnovoj chasti spektra ul'trafioletovogo izlucheniya na bioenergeticheskie processy sine-zelenoj vodorosli Spirulina platensis (Influence of the short-wavelength part of the ultraviolet radiation spectrum on the bioenergetic processes of the blue-green algae Spirulina platensis). *Ekologiya morya,* 2000, No. 40, pp. 26–28.

12. *Stepanova O.A.* Sensitivity of marine Heterotrophic bacteria to the Influence of Ultraviolet radiation, *Hydrobiological journal*, 2004, Vol. 40, No. 4, pp. 60–67.

13. https://solinstruments.by/produkciya/spektrofotometry/mc-122/ (April 1, 2022)

14. *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 582.26/.27.086.8 DOI:10.33075/2220-5861-2022-4-78-86

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОСТОВЫХ И ФЛЮОРЕСЦЕНТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОКСИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНОВ МЕДИ НА МОРСКИЕ МИКРОВОДОРОСЛИ

О.С. Алатарцева, Л.В. Стельмах, Р.Р. Сагадатова

ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»,
РФ, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2
E-mail: lustelm@mail.ru

Исследовано токсическое воздействие Cu^{2+} на два вида диатомовых водорослей *Cerataulina pelagica* и *Phaeodactylum tricornutum*, а также динофитовую *Prorocentrum nanum*. Показано, что минимальное содержание токсиканта в воде, вызывающее замедление роста культур с низкими начальными значениями биомассы, для *P. tricornutum* составило 1 мкг·л$^{-1}$, а для *P. nanum* – 50 мкг·л$^{-1}$. Повышение начальной биомассы водорослей в культуре *C. pelagica* в 5–13 раз вызвало снижение чувствительности водорослей к действию меди. Токсическое влияние меди на водоросли проявляется и в снижении значений rETR, а также F_v/F_m.

Ключевые слова: диатомовые и динофитовые микроводоросли, ионная форма меди, токсическое воздействие, Черное море.

Поступила в редакцию: 30.08.2022. После доработки: 04.10.2022.

Введение. Оценка качества морской среды является неотъемлемой частью комплексного мониторинга, регулярно выполняемого в различных районах прибрежных вод. Одно из направлений в этой работе связано с использованием организмов, представляющих разные трофические уровни, в том числе и микроводоросли. Для выявления реакции этих организмов на комплексное загрязнение морских прибрежных вод используют представителей разных таксономических групп и, прежде всего, диатомовые и динофитовые водоросли [1], которые являются главными компонентами фитопланктона многих морских экосистем.

Среди многочисленных загрязнителей морских вод, оказывающих ингибирующее влияние на гидробионты, важное место занимают тяжелые металлы. По своему токсическому воздействию они уступают только хлорорганическим соединениям и намного опережают нефтепродукты и фенолы. К числу наиболее токсичных металлов в первую очередь относятся ртуть, медь, цинк, кадмий, свинец, хром [2]. Наиболее высокие концентрации в водной толще Черного моря характерны для меди. Установлено, что ее содержание в северо-восточной части этого бассейна в настоящее время находится в диапазоне 1–125 мкг·л$^{-1}$, что существенно превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) для морских вод [3]. В этой связи возникает необходимость количественной оценки влияния данного токсиканта на водные организмы, включая микроводоросли. Влияние меди на микроводоросли, как правило, оценивают по приросту численности клеток или хлорофилла *a* как показателя биомассы в накопительной культуре в контроле и в опыте [4–6]. Однако определение этих параметров достаточно трудоемко. Вместе с тем, флуоресцентные параметры для этих целей используются довольно редко, хотя они могут быть определены в течение нескольких минут и достаточно информативны в плане оценки состояния фотосинтетического аппарата водорослей. Поэтому при исследованиях степени влияния токсикантов на водорослевые культуры необходимо оценивать их действие не только на биомассу водорослей, но и на показатели, определяемые с помощью метода ПАМ флуориметрии.

Цель настоящей работы состояла в исследовании токсического воздействия ионов меди на прирост биомассы и изменчивость некоторых флуоресцентных параметров в накопительных культурах диатомовых водорослей *Phaeodactylum tricornutum* и *Cerataulina pelagica*, а также динофитовой водоросли *Prorocentrum nanum*.

Материалы и методы. Объектом исследования были альгологически чистые культуры диатомовых водорослей *Cerataulina pelagica* (Cleve) Hendley, *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin, а также динофитовой *Prorocentrum nanum* (Schiller) Dodge & Bibby, выделенные из планктона Черного моря и содержащиеся в коллекции отдела экологической физиологии водорослей ФИЦ ИнБЮМ. Исходный объем клеток *C. pelagica* составил в среднем 2700 мкм^3, *P. tricornutum* – 60 мкм^3 и *P. nanum* – 65 мкм^3.

Рост культур в экспериментах осуществлялся в колбах объемом 200 мл на среде Гольдберга, содержащей нитраты, фосфаты и микроэлементы без органических компонентов [7]. При выращивании диатомовых водорослей в среду вносили 100 μM кремния. Культуры экспонировали при интенсивности света 100 μЭ·м$^{-2}$·с$^{-1}$ в диапазоне фотосинтетически активной радиации (ФАР), а также температуре 17–18ºС для диатомовых водорослей и 21–22ºС для динофитовой. С целью оценки влияния ионов меди (Cu^{2+}) на *P. tricornutum* и *C. pelagica* в опытные колбы добавляли водный раствор сульфата меди 6-ти концентраций от 1 до 200 мкг·л$^{-1}$ в пересчете на медь, а в колбы с *P. nanum* – от 1 до 100 мкг·л$^{-1}$. В экспериментах использовали сернокислую медь (CuSO4x5H2O) марки ЧДА производства России. Контролем служили культуры, росшие без добавления меди. Длительность каждого эксперимента составляла 3-е суток. Начальная биомасса культур по углероду в опытах на культуре *P. tricornutum* была равна 0,2 мг С·л$^{-1}$, на *C. pelagica* – 2,6 мг·л$^{-1}$, на *P. nanum* – 0,5 мг С·л$^{-1}$. Все культуры находились в фазе экспоненциального роста.

В ходе экспериментов из колб с культурами ежесуточно отбирали аликвоты в трех-четырех повторностях для оценки биомассы водорослей, F_v/F_m (максимальной эффективности работы фотосистемы II) и F'_v/F'_m (эффективности работы фотосистемы II при семи различных интенсивностях света в диапазоне ФАР 10–1000 μЭ·м$^{-2}$·с$^{-1}$).

Содержание углерода в клетках водорослей рассчитывали на основе измерений оптической плотности OD_{750} с помощью фотометра КФК-3 (Россия) с последующим пересчетом ее значений в единицы органического углерода (мг С/л). В основе расчетов лежат калибровочные графики, связывающие OD_{750} с концентрацией органического углерода, измеренного прямым методом [8]. Для построения калибровочных графиков концентрацию органического углерода в клетках водорослей определяли методом мокрого сжигания проб в хромовой смеси [9]. Относительная ошибка определений составляла 5–10%. Значения коэффициента линейных уравнений, отражающих связь между OD_{750} и концентрацией органического углерода в клетках водорослей, составляли для *P. tricornutum* – 14,228 мг С·л$^{-1}$, для *C. pelagica* – 64,842 мг С·л$^{-1}$ и для *P. nanum* – 17,595 мг С·л$^{-1}$, коэффициент детерминации уравнений (R^2) был равен 0,990–0,997.

Измерения F_v/F_m, а также F'_v/F'_m осуществляли на ПАМ флуориметре Aqua Pen-C AP 110 (Чешская Республика). Относительная погрешность определений показателей не превышала 5%. Значения относительной скорости электронного транспорта (rETR) в относительных единицах рассчитывали на основе произведения F'_v/F'_m и соответствующей интенсивности света [10].

Статистический анализ и построение графиков. Обработка данных выполнена в программе Excel 2007 для Windows. Были рассчитаны среднеарифметические значения исследуемых параметров и стандартное отклонение. Статистическая значимость различий между вариантами определялась по t-критерию Стьюдента. Построение графиков осу-

ществлялось с помощью программы Grafer 3.

Результаты. Влияние меди на *Phaeodactylum tricornutum*. Этот мелкоклеточный вид диатомовых водорослей со средним объемом клеток 60 мкм^3 подвергался воздействию меди в следующих концентрациях: 1, 5, 10, 50, 100 и 200 мкг·л$^{-1}$. При начальном количестве органического углерода 0,2 мг С·л$^{-1}$ его прирост наблюдался в опытных колбах и в контроле в течение трех суток (рис. 1а).

Однако значения биомассы в опыте были достоверно ниже, чем в контроле при всех концентрациях токсиканта ($p< 0,001$). По мере увеличения количества Cu^{2+} в среде эти различия возрастали. Показатель F_v/F_m в контроле, составивший 0,60, в течение 3-х суток не изменялся и достоверно был выше ($p< 0,05$), чем в культурах, подвергнутых токсическому воздействию меди в концентрациях 5–200 мкг·л$^{-1}$ (рис. 1б). Минимальное количество токсиканта (1 мкг·л$^{-1}$) практически не вызывало ингибирование этого параметра на протяжении всего эксперимента. Самое низкое значение Fv/Fm (0,37) получено на 3-и сутки при максимальной концентрации меди. Значения rETR в конце эксперимента во всем исследованном световом диапазоне (10–1000 μЭ·м$^{-2}$·с$^{-1}$) в контроле и в присутствии Cu^{2+} в концентрации 1 мкг·л$^{-1}$ достоверно не различались ($p> 0,05$). Тогда как повышение содержания меди в среде в 5 раз вызывало снижение этого параметра в 1,4–1,8 раза при интенсивностях света ≥100 μЭ м$^{-2}$·с$^{-1}$ (рис. 1с).

В это же время F_v/F_m снизилось лишь на 10%.

Влияние меди на *Cerataulina pelagica*. В эксперименте с культурой *C. pelagica*, имеющей средний объем клеток 2700 мкм^3 и начальную биомассу 2,6 мг С·л$^{-1}$, концентрация меди в среде составляла 10, 100 и 200 мкг·л$^{-1}$, так как более низкое содержание токсиканта влияло крайне слабо. Через сутки роста культуры количество органического углерода было достоверно ниже, чем в контроле ($p < 0.05$) при концентрации меди 200 мкг·л$^{-1}$, тогда как при более низких ее значениях (10 и 100 мкг·л$^{-1}$) различия между опытными пробами и контролем не выявлены (рис. 2а).

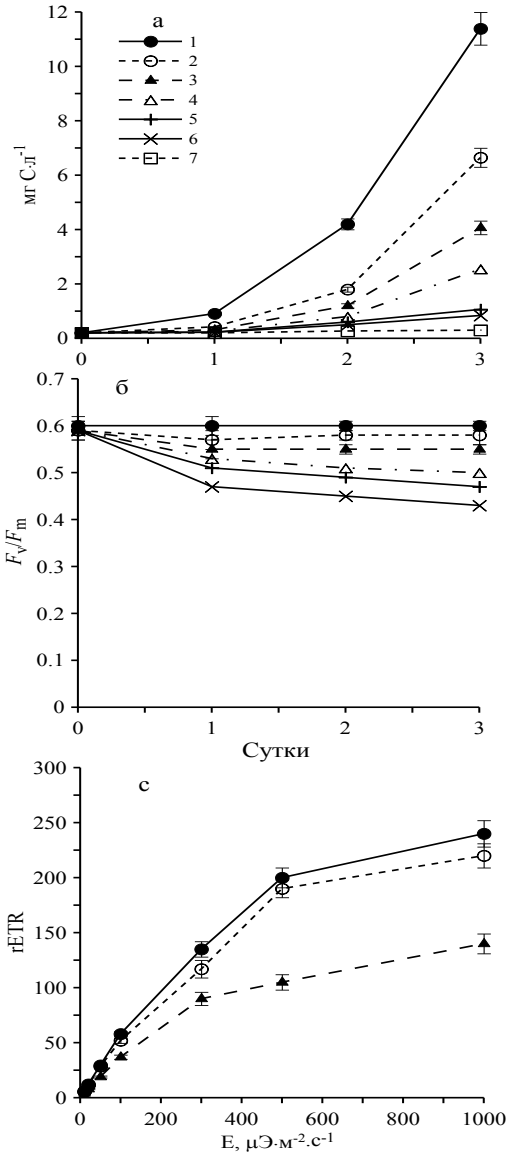


Рис. 1. Динамика содержания органического углерода (а), величины Fv/Fm (б) и относительной скорости электронного транспорта, rETR на 3-и сутки (с) в культуре *P. tricornutum* при различных концентрациях ионов меди: 1 – контроль, 2 – 1 мкг·л$^{-1}$, 3 – 5 мкг·л$^{-1}$, 4 – 10 мкг·л$^{-1}$, 5 – 50 мкг·л$^{-1}$, 6 – 100 мкг·л$^{-1}$, 7 – 200 мкг·л$^{-1}$

Fig. 1. Dynamics of organic carbon content (a), F_v/F_m value (b) and relative electron transport rate, rETR on the 3rd day (c) in *P. tricornutum* culture at different concentrations of copper ions: 1 – control, 2 – 1 μg·l^{-1}, 3 – 5 μg·l^{-1}, 4 – 10 μg·l^{-1}, 5 – 50 μg·l^{-1}, 6 – 100 μg·l^{-1}, 7 – 200 μg·l^{-1}

На вторые и третьи сутки наибольший прирост биомассы наблюдался в контроле, а при концентрации токсиканта 10 мкг·л$^{-1}$ он существенно ослабевал. В остальных вариантах опыта рост водорослей не наблюдался.

Показатель F_v/F_m в контроле, составивший 0,60, в течение 3-х суток не изменялся и достоверно был выше ($p< 0,05$), чем в культурах, подвергнутых токсическому воздействию меди при всех ее концентрациях (рис. 2б).

В результате воздействия на водоросли Cu^{2+} в концентрациях 10–200 мкг·л$^{-1}$ наблюдалось постепенное снижение максимальной эффективности работы фотосистемы II к концу экспериментов и скорость этого снижения возрастала по мере увеличения количества токсиканта. На 3-и сутки величина F_v/F_m была минимальна, составив 0,1, при максимальном содержании меди в воде – 200 мкг·л$^{-1}$.

Значения rETR на третьи сутки во всем исследованном световом диапазоне в присутствии Cu^{2+} в концентрации 10 мкг·л$^{-1}$ были достоверно ниже относительно контроля ($p < 0,05$). Этот показатель снижался в 1,3– 2 раза и более (рис. 2 с). Тогда как отношение F_v/F_m в этих условиях уменьшалось лишь на 17%.

Влияние меди на *P. nanum*. При низком начальном количестве органического углерода (0,5 мг С·л$^{-1}$) в культуре *P. nanum* с объемом клетки 65 мкм^3 количество меди в опытных пробах составляло 1, 3, 5, 10, 50 и 100 мкг·л$^{-1}$. При низких ее концентрациях (1–10 мкг·л$^{-1}$) прирост биомассы водорослей в течение трех суток слабо отличался от контроля.

Её конечные значения были в 6 раз выше исходных (рис. 3а). Тогда как под действием токсиканта в концентрации 50 и 100 мкг·л$^{-1}$ содержание органического углерода на третьи сутки было лишь в 2 и в 1,4 раза выше исходного значения соответственно.

Показатель F_v/F_m в контроле, составивший 0,53, в течение 3-х суток постепенно снижался до 0,42 (рис. 3б).

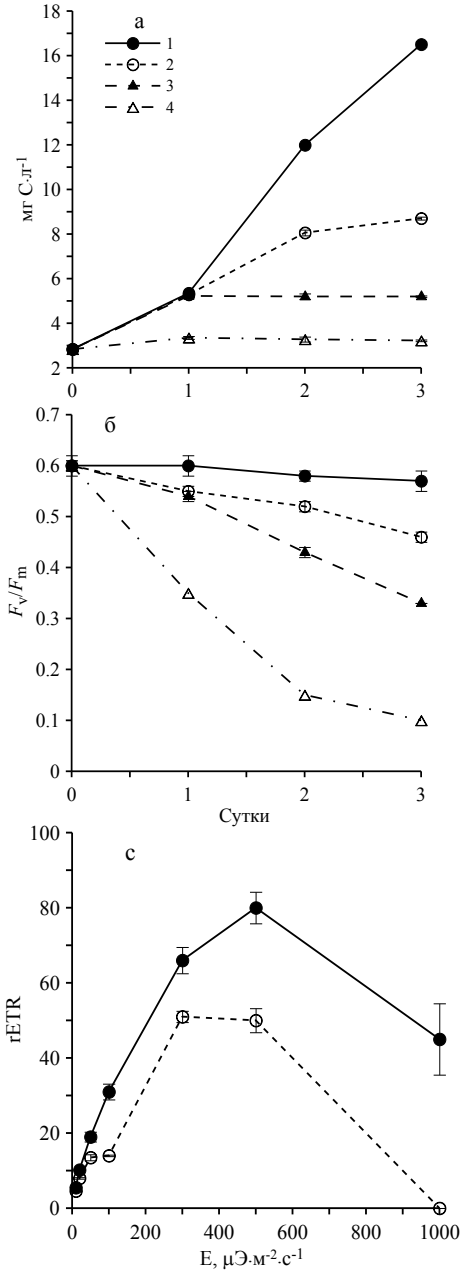


Рис. 2. Динамика содержания органического углерода (а), величины Fv/Fm (б) и относительной скорости электронного транспорта, rETR на 3-и сутки (с) в культуре *C. pelagica* при различных концентрациях ионов меди: 1 – контроль, 2 – 10 мкг·л$^{-1}$, 3 – 100 мкг·л$^{-1}$, 4 – 200 мкг·л$^{-1}$

Fig. 2. Dynamics of organic carbon content (a), F_v/F_m value (b) and relative electron transport rate, rETR on day 3rd (c) in *C. pelagica* culture at different concentrations of copper ions: 1 – control, 2 – 10 μg·l^{-1}, 3 – 100 μg·l^{-1}, 4 – 200 μg·l^{-1}

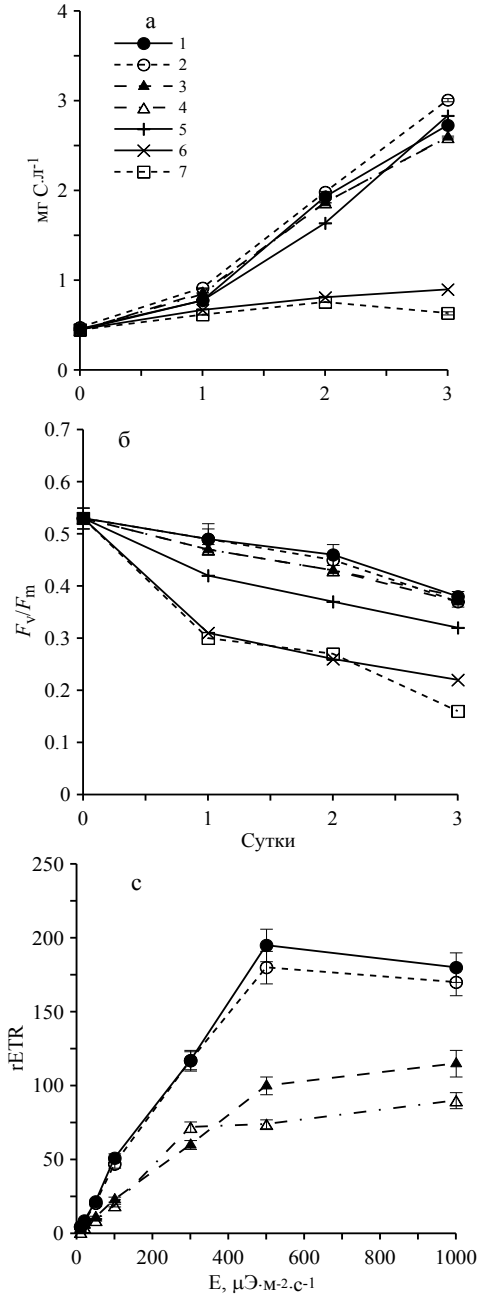


Рис. 3. Динамика содержания органического углерода (а), величины Fv/Fm (б) и относительной скорости электронного транспорта, rETR на 3-и сутки (с) в культуре *P. nanum* при концентрациях ионов меди:
1 – контроль, 2 – 1 мкг·л$^{-1}$, 3 – 3 мкг·л$^{-1}$, 4 – 5 мкг·л$^{-1}$, 5 – 10 мкг·л$^{-1}$, 6 – 50 мкг·л$^{-1}$, 7 – 100 мкг·л$^{-1}$

Fig. 3. Dynamics of organic carbon content (a), F_v/F_m value (b) and relative electron transport rate, rETR on day 3rd (c) in *P. nanum* culture at concentrations of copper ions: 1 – control, 2 – 1 µg·l^{-1}, 3 – 3 µg·l^{-1}, 4 – 5 µg·l^{-1}, 5 – 10 µg·l^{-1}, 6 – 50 µg·l^{-1}, 7 – 100 µg·l^{-1}

Подобные его изменения получены при низких концентрациях меди в среде, а при ее содержании ≥ 10 мкг·л$^{-1}$ это снижение было достоверно больше, чем в контроле ($p < 0,05$).

Значения rETR на третьи сутки во всем исследованном световом диапазоне в контроле и в присутствии Cu^{2+} в концентрации 1 мкг·л$^{-1}$, достоверно не различались ($p > 0,05$). Тогда как повышение содержания меди в среде до 3 и 5 мкг·л$^{-1}$ вызвало снижение этого параметра в 2–3 раза относительно контроля (рис. 3с).

Обсуждение. Медь в крайне низких концентрациях оказывает стимулирующее влияние на водоросли, участвуя в ряде метаболических процессов и усиливая работу многих ферментов [2, 11]. Однако ее довольно высокое содержание в ионной форме в водах прибрежных районов Черного моря может вызывать угнетение роста фитопланктона. Поэтому важно понять, при каких минимальных концентрациях этот металл оказывает подавляющее действие на черноморские виды диатомовых и динофитовых водорослей и каков характер этого воздействия на их функциональные параметры.

Как правило, в таких исследованиях используют водоросли в экспоненциальной фазе роста, которая характеризуется периодом времени, когда отдельные клетки делятся с постоянной скоростью. В культурах, находящихся в стационарной фазе, где прирост клеток почти не наблюдался, чувствительность морских микроводорослей к тяжелым металлам увеличивалась на 10–60% по сравнению с экспоненциально растущей культурой [6]. По этой причине наши эксперименты выполнены на экспоненциально растущих культурах.

Степень устойчивости различных видов микроводорослей к действию токсикантов чаще всего оценивают по приросту численности клеток [4, 5]. Однако из-за разного объема клеток их биомасса при одной и той же численности может сильно различаться, что не позволяет

корректно сопоставлять такие результаты.

В нашей работе оценка прироста водорослей осуществлялась по органическому углероду, то есть по биомассе. Оказалось, что самым чувствительным видом водорослей к действию меди оказалась диатомовая водоросль *P. tricornutum* с самой низкой начальной биомассой (0,2 мг С·л$^{-1}$). Даже небольшая концентрация меди, составившая 1 мкг·л$^{-1}$, уже в первые сутки эксперимента вызывала замедление роста водорослей. Тогда как параметры флуоресценции, такие как F_v/F_m и rETR, снижались относительно контроля при концентрации Cu^{2+}, равной 5 мкг·л$^{-1}$ и выше. В отличие от биомассы водорослей, определение которой достаточно трудоемко, флуоресцентные параметры могут быть измерены в течение нескольких минут в пробе объемом всего лишь 2–3 мл. Причем относительная скорость электронного транспорта (rETR), измеренная на третьи сутки, оказалась более чувствительна к действию токсиканта по сравнению с параметром F_v/F_m, характеризующим максимальную эффективность работы фотосистемы II. Подобные результаты были получены ранее в исследованиях на пресноводных водорослях [12].

Повышение исходной биомассы в культуре диатомовой водоросли *C. pelagica* в 13 раз относительно биомассы *P. tricornutum*, стало одной из основных причин снижения чувствительности водорослей к действию Cu^{2+}. Через сутки от начала эксперимента прирост биомассы *C. pelagica* замедлялся относительно контроля только при концентрации меди 200 мкг·л$^{-1}$, тогда как ее содержание в воде 10 и 100 мкг·л$^{-1}$ не оказывало заметного влияния на культуру. Однако более длительное воздействие этих концентраций вызвало угнетение роста данного вида. Что касается параметра F_v/F_m, то его значения уже в первые сутки при всех концентрациях токсиканта были достоверно ниже, чем в контроле. А параметр rETR, измеренный на третьи сутки эксперимента, показал большую чувствительность к воздействию меди, чем F_v/F_m.

Наиболее устойчивым видом водорослей к воздействию Cu^{2+} оказалась мелкоклеточная динофлагеллята *P. nanum*. Даже при низкой ее исходной биомассе (0,5 мг С·л$^{-1}$) только достаточно высокие концентрации меди (50 и 100 мкг·л$^{-1}$) вызвали угнетение роста данной культуры в течение всех трех суток. Однако максимальная эффективность работы фотосистемы II понизилась уже при содержании Cu^{2+} в воде 10 мкг·л$^{-1}$, а относительная скорость электронного транспорта, измеренная на третьи сутки эксперимента, была существенно меньше, чем в контроле под действием токсиканта в концентрации лишь 3 мкг·л$^{-1}$.

Таким образом, параметр rETR позволяет обнаружить угнетающее влияние меди при самых низких исходных концентрациях этого токсиканта в воде уже через сутки от начала воздействия. На втором месте по степени чувствительности к токсиканту находится показатель F_v/F_m. Наименее чувствительным параметром является скорость прироста биомассы водорослей.

Выполненные нами исследования показали наличие межвидовой изменчивости устойчивости микроводорослей к загрязняющим веществам. Так, при низкой начальной биомассе водорослей устойчивость мелкоклеточной динофлагелляты *P. nanum* к токсическому воздействию меди была выше, чем у диатомовой водоросли *P. tricornutum*, имеющий такой же объем клетки, как и у первого вида. Вероятно, не только биомасса, но и другие характеристики и свойства водорослей влияют на их устойчивость к тяжелым металлам. Накопление металлов водорослями происходит, прежде всего, путем их адсорбции на клеточной стенке [13], структура которой у разных водорослей различается. Тяжелые металлы, проникшие в клетку, подвергаются в определенной мере детоксикации, что может быть достигнуто за счет связывания со специфическими внутриклеточными соединениями и/или транспорта металлов в определенные клеточные компартменты [14, 15].

Заключение. Исследованные два вида диатомовых водорослей *P. tricornutum*, *C. pelagica* и один вид динофитовых *P. nanum* показали разную степень чувствительности к токсическому воздействию меди в ионной форме. Наиболее чувствительным оказался *P. tricornutum*, а наименее – *P. nanum*.

Угнетающий эффект меди на водоросли выявляется, прежде всего, по снижению значений относительной скорости электронного транспорта (rETR), особенно при интенсивностях света ≥100 μЭ $м^{-2} \cdot с^{-1}$. Вторым по чувствительности к токсическим веществам параметром является максимальная эффективность фотосистемы II (F_v/F_m). Самым устойчивым показателем к действию Cu^{2+} является скорость прироста биомассы водорослей.

Значения концентрации меди, вызывающие угнетение функциональных параметров водорослей, сопоставимы с ее содержанием в прибрежных водах Черного моря.

Работа выполнена по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ "Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом" (№ гос. регистрации 121041400077-1).

Авторы выражают искреннюю благодарность м.н.с. отдела экологической физиологии водорослей ФИЦ ИнБЮМ Мансуровой И.И. за помощь при выполнении данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stelmakh L., Kovrigina N.* Phytoplankton Growth Rate and Microzooplankton Grazing under Conditions of Climatic Changes and Anthropogenic Pollution in the Coastal Waters of the Black Sea (Sevastopol Region) // Water. 2021. V. 13. Iss. 22. Article no. 3230 (13 p.).

2. *Мурадов С.В.* Воздействие тяжёлых металлов на водоросли-макрофиты Авачинской губы // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-9. С. 1998–2002.

3. *Кораблина И.В., Барабашин Т.О., Геворкян Ж.В., Евсеева А.И.* Динамика распределения тяжёлых металлов в водной толще северо-восточной части Чёрного моря после 2000 г. // Труды ВНИРО. 2021. Том 183. С. 96–112.

4. *Satoh A., Vudikaria L. Q., Kurano N., Miyachi S.* Evaluation of the sensitivity of marine microalgal strains to the heavy metals, Cu, As, Sb, Pb and Cd // Environment International. 2005. 31. P. 713–722.

5. *Levy, J. L., Stauber, J. L., and Jolley, D.F.* Sensitivity of marine microalgae to copper: the effect of biotic factors on copper adsorption and toxicity // Science of the Total Environment. 2007. 387. P. 141–154.

6. *Andersson B., Godhe A., Filipsson H.L., Rengefors K., Berglund O.* Differences in metal tolerance among strains, populations, and species of marine diatoms – Importance of exponential growth for quantification //Aquatic Toxicology. 2020. 226. 105551

7. *Финенко З.З., Стельмах Л.В., Галатонова О.А., Бабич И.И.* Культивирование водорослей в лабораторных условиях //Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования. Севастополь: Экоси-Гидрофизика. 2008. С. 186–200.

8. *Kvíderová, J., Lukavský, J.* (2003) The cultivation of *Phaeodactylum tricornutum* in crossed gradients of temperature and light // Algological Studies. 2003. 110 (1). P. 67–80.

9. *Бергер В.Я., Митяев М.В., Сухотин А.А.* Опыт использования метода мокрого сжигания для определения концентрации взвешенных органических веществ в морской воде // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 328–332.

10. *Cruz S., Serôdio, J.* Relationship of rapid light curves of variable fluorescence to photoacclimation and non-photochemical quenching in a benthic diatom // Aquatic Botany. 2008. 88. P. 256–264.

11. *Sunda, W.G.* Trace metal interactions with marine phytoplankton // Biological Oceanography. 1989. 6. P. 411–442.

12. *Тодоренко Д.А. Маторин Д.Н, Алексеев А.А, Тунгатарова Д.И., Орлова В.С.* Изучение токсичности сульфата меди и наночастиц серебра с использованием флуоресценции микроводорослей *Scenedesmus quadricauda* // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия "Экология и безопасность жизнедеятельности". 2014. № 1. С. 25–32

13. *Rebhum, S., Ben-Amotz, A.* The distribution of cadmium between the marine alga chlorella and water medium. Effect on algal growth // Water Research. 1984. 18 (2). P. 173–178.

14. *Perales-Vela, H.V., Peña-Castro, J.M. and Cañizares-Villanueva R.O.* Heavy metal detoxification in eukaryotic microalgae // Chemosphere. 2006. 64. P. 1–10.

15. *Arunakumara, K.K.I.U. & Zhang, X.* (2008) Heavy metal bioaccumulation and toxicity with special reference to microalgae. Journal of Ocean University of China. 2008. 7. P. 60–64.

THE USE OF GROWTH AND FLUORESCENT INDICATORS TO ASSESS THE TOXIC EFFECT OF COPPEER IONS ON MARINE MICROALGAE

O.S. Alatartseva, L.V. Stelmakh, R.R. Sagadatova

The A.O. Kovalevsky Institute of Biology of Southern Seas of RAS, Sevastopol, Nachimov Av., 2

The toxic effect of copper in ionic form (Cu^{2+}) on two species of diatoms *Cerataulina pelagica* and *Phaeodactylum tricornutum*, as well as on the dinoflagellate alga *Prorocentrum nanum*, is studied. It is shown that the minimum content of the toxicant in water, causing the slowing down of the growth of enrichment cultures with low initial values of biomass, was 1 $\mu g \cdot L^{-1}$ for *P. tricornutum*, and 50 $\mu g \cdot L^{-1}$ for *P. nanum*. An increase in the initial biomass of algae in the culture of *C. pelagica* by 5–13 times resulted in a decrease in the algae sensitivity to the impact of copper. The toxic effect of copper on algae is also manifested in a decrease in the values of rETR, as well as in F_v/F_m.

Keywords: diatoms and dinoflagellate microalgae, ionic form of copper, toxic effect, Black Sea.

REFERENCES

1. Stelmakh L. and Kovrigina N. Phytoplankton Growth Rate and Microzooplankton Grazing under Conditions of Climatic Changes and Anthropogenic Pollution in the Coastal Waters of the Black Sea (Sevastopol Region). Water, 2021, Vol. 13, Iss. 22, Article no. 3230 (13 p.).

2. Muradov S.V. Vozdejstvie tjazhjolyh metallov na vodorosli-makrofity Avachinskoj guby (Impact of heavy metals on macrophyte algae of Avacha Bay). Fundamental'nye issledovanija, 2014, No 9-9, pp. 1998–2002.

3. Korablina I.V., Barabashin T.O., Gevorkjan Zh.V., and Evseeva A.I. Dinamika raspredelenija tjazhjolyh metallov v vodnoj tolshhe severo-vostochnoj chasti Chjornogo morja posle 2000 g. (Dynamics of distribution of heavy metals in the water column of the northeastern part of the Black Sea after 2000). Trudy VNIRO, 2021, Vol. 183, pp. 96–112.

4. Satoh A., Vudikaria L. Q., Kurano N., and Miyachi S. Evaluation of the sensitivity of marine microalgal strains to the heavy metals, Cu, As, Sb, Pb and Cd. Environment International, 2005, Vol. 31, pp. 713–722.

5. Levy J. L., Stauber J. L., and Jolley D. F. Sensitivity of marine microalgae to copper: the effect of biotic factors on copper adsorption and toxicity. Science of the Total Environment, 2007, Vol. 387, pp. 141–154.

6. Andersson B., Godhe A., Filipsson H.L., Rengefors K., and Berglund O. Differences in metal tolerance among strains, populations, and species of marine diatoms – Importance of exponential growth for quantification. Aquatic Toxicology, 2020, Vol. 226, 105551.

7. Finenko Z.Z., Stel'mah L.V., Galatonova O.A., and Babich I.I. Kul'tivirovanie vodoroslej v laboratornyh uslovijah //Mikrovodorosli Chernogo morja: problemy sohranenija bioraznoobrazija i biotehnolog-

icheskogo ispol'zovanija (Cultivation of algae in laboratory conditions. Microalgae of the Black Sea: problems of biodiversity conservation and biotechnological use). Sevastopol': Jekosi-Gidrofizika, 2008, pp. 186–200.

8. Kvíderová, J. and Lukavský, J. The cultivation of Phaeodactylum tricornutum in crossed gradients of temperature and light. Algological Studies, 2003, Vol. 110 (1), pp. 67–80.

9. Berger V.Ja., Mitjaev M.V., and Suhotin A.A. Opyt ispol'zovanija metoda mokrogo szhiganija dlja opredelenija koncentracii vzveshennyh organicheskih veshhestv v morskoj vode (Experience in using the wet burning method to determine the concentration of suspended organic matter in sea water). Okeanologija, 2016, Vol. 56, No. 2, pp. 328–332.

10. Cruz S. and Serôdio, J. Relationship of rapid light curves of variable fluorescence to photoacclimation and non-photochemical quenching in a benthic diatom. Aquatic Botany, 2008, Vol. 88, pp. 256–264.

11. Sunda W.G. (1989) Trace metal interactions with marine phytoplankton. Biological Oceanography, 1989, Vol. 6, pp. 411–442.

12. Todorenko D.A., Matorin D.N, Alekseev A.A, Tungatarova D.I., and Orlova V.S. Izuchenie toksichnosti sul'fata medi i nanochastic serebra s ispol'zovaniem fluorescencii mikrovodoroslej Scenedesmus quadricauda (Study of the toxicity of copper sulfate and silver nanoparticles using the fluorescence of microalgae Scenedesmus quadricauda). Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Serija "Jekologija i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti", 2014, No. 1, pp. 25–32.

13. Rebhum S. and Ben-Amotz A. The distribution of cadmium between the marine alga chlorella and water medium. Effect on algal growth. Water Research, 1984, Vol. 18 (2), pp. 173–178.

14. Perales-Vela H.V., Peña-Castro J.M., and Cañizares-Villanueva R.O. Heavy metal detoxification in eukaryotic microalgae. Chemosphere, 2006, Vol. 64, pp. 1–10.

15. Arunakumara K.K.I.U. and Zhang X. Heavy metal bioaccumulation and toxicity with special reference to microalgae. Journal of Ocean University of China, 2008, Vol. 7, pp. 60–64.

УДК 10167 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-87-92

КОНТРОЛЬ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВЕЩЕСТВ

Л.Р. Асфандиярова, Г.В. Хакимова, В.М. Ильин

Институт химических технологий и инжиниринга
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
в г. Стерлитамаке, РФ, г. Стерлитамак, пр. Октября, 2
E-mail: asfand_lilya@mail.ru

В ходе лабораторного исследования изучена возможность повышения степени очистки сточных вод от ионов меди путем добавления в сток железосодержащих соединений. Проведены 2 серии опытов: в первой – экспериментально увеличивали соотношение содержания железа и меди, во второй – увеличивали температуру стока до 65°С. Были установлены оптимальные доза и условия проведения процесса, обеспечивающие максимальную эффективность очистки от ионов тяжелых металлов.

Ключевые слова: сточные воды, тяжелые металлы, флокуляция, соосаждение, доза, эффективность, высокомолекулярный флокулянт.

Поступила в редакцию: 31.08.2022. После доработки: 09.10.2022.

Введение. Очистка сточных вод являетсяважной и сложной производственной проблемой длямногих химическихпредприятий так как существующие на данный момент технологиипредварительной очистки сточных на производствах органического синтеза характеризуются недостаточно совершенными применяемыми методами очистки образующихся водныхстоков перед их сбросом на биологические очистные сооружения (БОС) [1].

При поступлении таких сточных вод на БОС ввиду содержания в них биологически трудноокисляемых соединений происходит их неполная очистка и поллютанты попадая в водоемы, негативно воздействуют на их флору и фауну [2].

Поиск эффективных способов очистки промышленных стоков является следствием той современной экологической ситуации, которая диктует необходимостьочистки сточных вод до соответствия нормам предельно-допустимых концентраций. Одним из эффективных способов интенсификации существующих технологий очистки природных и сточных вод является использование высокомолекулярных флокулянтов самостоятельно или совместно с неорганическими коагулянтами [3, 4]. Выбор эффективного реагента для очистки конкретного типа сточной воды осложняется также наличием широкого ассортимента синтетических флокулянтов, что требует проведения длительных и трудоемких исследований.

Анализ литературных источников позволил установить, что при совместном осаждении нескольких металлов достигаются лучшие результаты, чем при осаждении каждого из металлов в отдельности, что связано с образованием смешанных кристаллов и адсорбцией ионов металлов на поверхности твердой фазы [5, 6].

Кроме этого, для улучшения качества и повышения эффективности процесса очистки воды от ионов меди необходимо наличие в воде ионов железа, характеризующих процесс очистки как совместное соосаждение металлов в сточной воде [7].

Имеющееся в сточных водах соотношение металлов Fe/Cu = 33,0/27,5 не обеспечивает очистки сточных вод до требуемых нормативов, поэтому проведены лабораторные исследования по изучению возможности повышения степени очистки сточных вод от ионов меди при добавлении в них железосодержащих соединений [8].

Основная часть. Объектом исследования является сточная вода, содержащая ионы тяжелых металлов (меди и железа) и алюминия. Флокуляцию проводили в цилиндрах объемом 0,250 дм^3 (3 серии опытов). В три цилиндра наливали по 0,25 дм^3 исследуемой жидкости, затем проводили интенсивное перемешивание в течение 3 минут. Время осаждения во всех проводимых опытах составляло 30 минут. Температура – 20^{o}C. pH исходной сточной воды – 10,2.

Измерение остаточных концентраций загрязняющих веществ в очищенной воде проводилось в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.48-96, ГОСТ 4011-72 и ПНД Ф 14.1:2:4.166-2000 (методики выполнения измерений массовых концентраций металлов в сточных водах фотометрическими методами).

Исходные концентрации меди, железа и алюминия в сточной воде составляют 27,5, 33,0 и 0,56 мг/л соответственно.

В качестве соосадителя был выбран реагент железо (III) хлорид 6-водный $FeCl_3 \cdot 6H_2O$.

В первой серии экспериментов нами производилась оценка эффективности очистки сточной воды в зависимости от увеличения соотношения содержания железа и меди, т.е. увеличение концентрации ионов железа до 66 и 99 мг/л соответственно. В качестве флокулянта в данном случае был использован синтетический полимер на основе полиакриламида – Праестол 2510.

Условия проведения испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1. Условия проведения испытаний

Номер образца	Концентрация ионов железа в исходной воде, мг/л	Наименование флокулянта	Доза флокулянта, мл	Концентрация флокулянта, %	Температура, ^{o}C
1	33,0	Праестол 2510	0,1	0,5	20
2	66,0		0,1	0,5	20
3	99,0		0,1	0,5	20

Результаты испытаний представлены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2. Результаты серии опытов

№ образца	Концентрация в очищенной воде			Показатель pH
	Ионов меди, мг/л	Ионов железа, мг/л	Ионов алюминия, мг/л	
1	3,76	0,17	>0,56	10,0
2	0,01	2,03	0,38	9,8
3	0,2	0,5	>0,56	9,45

При проведении эксперимента установлено, что процессы хлопьеобразования и соответственно их осаждения происходят интенсивнее при повышенном содержании общего железа в сточной воде, сами хлопья имеют более плотную структуру и более крупные, что увеличивает скорость их седиментации (рис. 2).

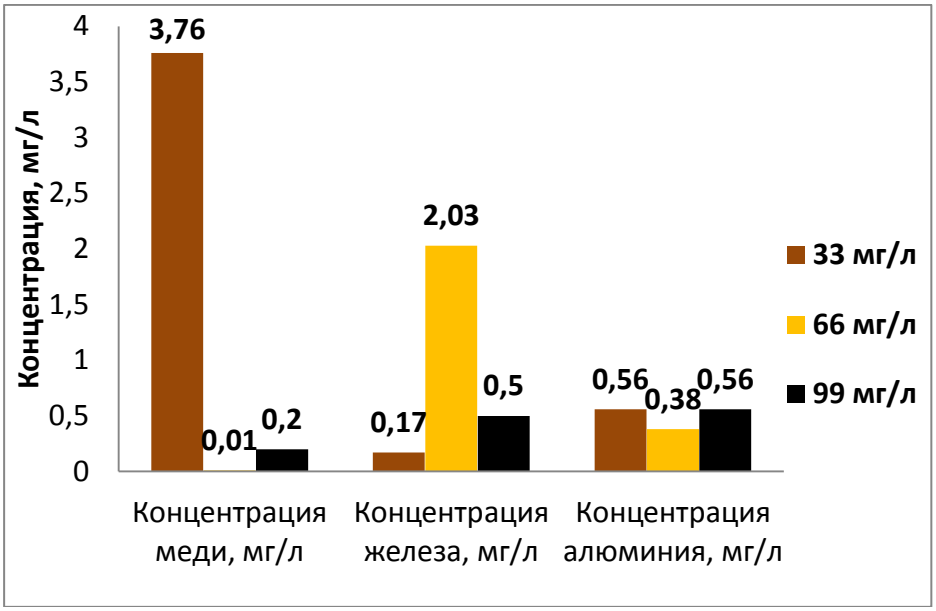


Рис. 1. Концентрация загрязняющих веществ в очищенной воде в зависимости от начальной концентрации Fe в воде (t = 20ºC)
Fig. 1. The concentration of pollutants in purified water depending on the initial concentration of Fe in water (t = 20ºC)

При соотношении Fe/Cu в сточной воде, равном 33,0/27,5, обеспечивается требуемая степень очистки вод только от железа (0,17 мг/л при норме для БОС 0,63 мг/л); концентрация меди при этом остается на достаточно высоком уровне 3,76 мг/л. С увеличением концентрации ионов железа в исходной сточной воде в 2 раза, происходит одновременно уменьшение ионов меди до 0,01 мг/л и увеличение содержания ионов железа в очищенной воде (2,03 мг/л). При концентрации ионов железа в сточной воде 99 мг/л, концентрации ионов меди и железа в очищенной воде равны 0,2 и 0,5 мг/л соответственно. Стоит также отметить, что при добавлении хлорного железа в сточную воду происходит снижение величины pH до 9,45.

Нами была проведена следующая серия аналогичных экспериментов, но с увеличением температуры стока до 65°С.Условия проведения испытаний представлены в табл. 3.

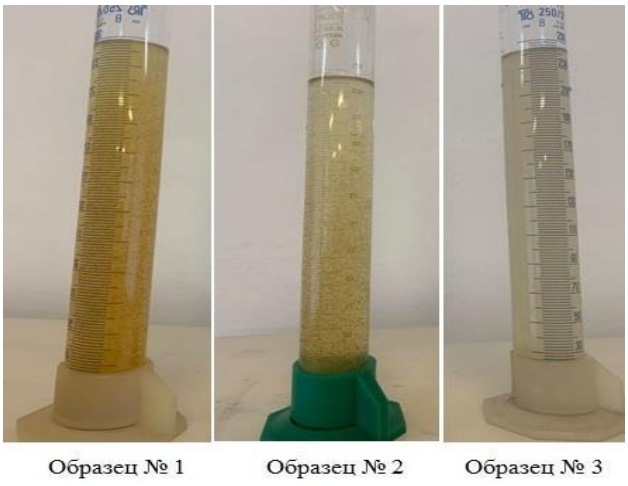


Рис. 2. Процесс осаждения ионов металлов в пробах сточной воды
Fig. 2. The process of formation of metal ions in wastewater samples

Таблица 3. Условия проведения испытаний

Номер образца	Концентрация ионов железа в исходной воде, мг/л	Наименование флокулянта	Доза флокулянта, мл	Концентрация флокулянта, %	Температура, °С
1	33,0	Праестол 2510	0,1	0,5	65
2	66,0		0,1	0,5	65
3	99,0		0,1	0,5	65

Результаты испытаний представлены в табл. 4 и на рис. 3.

Таблица 4. Результаты серии опытов

№ образца	Концентрация в очищенной воде			Показатель pH
	Ионов меди, мг/л	Ионов железа, мг/л	Ионов алюминия, мг/л	
1	3,8	0,2	>0,56	10,1
2	0,4	0,17	>0,56	9,6
3	0,25	0,5	0,46	9,15

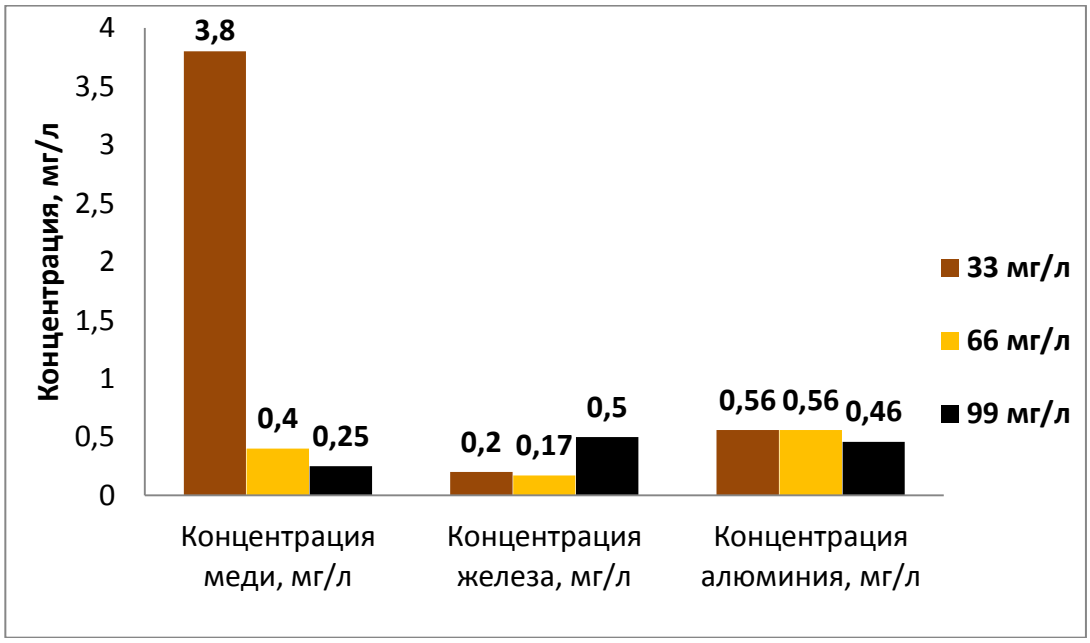


Рис. 3. Концентрация загрязняющих веществ в очищенной воде в зависимости от начальной концентрации Fe в воде (t = 65°С)
Fig. 3. The concentration of pollutants in purified water depending on the initial concentration of Fe in water (t = 65°С)

С увеличением температуры эффективность очистки от ионов железа увеличивается, а от ионов меди – наоборот, уменьшается. Так, например, при концентрации железа в воде 66 мг/л, концентрация его в очищенной воде составила 0,17 мг/л, т.е. эффективность очистки увеличилась в 12 раз (при комнатной температуре концентрация железа в очищенной воде 2,03 мг/л). Эффективность очистки от ионов меди (при соотношении Fe/Cu = 66:27,5) при комнатной температуре составила 99,96%, а при нагревании – 98,5%. Процессы соосаждения в меньшей степени влияют на эффективность очистки от ионов алюминия: так, например, минимальное остаточное содержание ионов алюминия наблюдается при соотношении Fe/Cu = 66:27,5 (при комнатной температуре) и составляет 0,38 мг/л.

Выводы. Контроль процесса в лабораторном эксперименте показывает, что при увеличении содержания ионов железа в сточной воде, а именно при добавлении реагента $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, происходит более эффективное осаждение меди за счет образования смешанных кристаллов и адсорбции ионов меди на поверхности твердой фазы [7]; при этом оптимальным является соотношение Fe/Cu = 99:27,5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Савельев С.Н., Савельева А.В., Фридланд С.В*. Исследование коагуляционно-флокуляционной очистки сточной воды производства органического синтеза. Вестник технологического университета, Т. 21, № 1, 2018. С. 173–176.

2. *Савельев С.Н., Савельева А.В., Фридланд С.В***.** Безопасность жизнедеятельности, 1, 2015. С. 40−44.

3. *Asfandiyarova L.R., Khakimova G.V., Islamutdinova A.A.* Features of sewage sludge dewatering process at the use of flocculant based on epichlorohydrin and dimethylamine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 839(4), 042093

4. *Асфандиярова Л.Р, Хакимова Г.В.* Очистка сточных вод от взвешенных веществ // Materials of the XVII International scientific and practical Conference Science without borders–2021, March 30–April 7, 2021: Sheffield. ScienceandeducationLTD, P. 11–14.

5. *Салов В.Н., Сусяева М.Ю.* Экономические и технологические аспекты синтеза полимерных флокулянтов и инновационные технологии полимеризации // Вода: экология и технология: Тезисы / IY Международный конгресс. М., 2000. С. 416.

6. *Гандурина Л.В*. Современные способы повышения качества питьевой воды // Инженерное обеспечение объектов строительства: Обзорная информации / ВНИИНТПИ. М., 2003. Вып. 4. С. 59.

7. *Асфандиярова Л.Р., Хакимова Г.В.* Применение синтетических флокулянтов для интенсификации очистки сточных вод // Материали за XVII международна научна практична конференция, Бъдещитеизследвания. 2022, 17–25 февруари, 2022: София. « БялГРАД-БГ». С. 21–23

8. *Асфандиярова Л.Р., Хакимова Г.В.,* Verwendungvon Flockungsmittelfurdie Abwasserbehandlungder Produktion von-Soda // Проблемы научной мысли. 2021. Т. 4, № 2. С. 16–18.

CONTROL AND INTENSIFICATION OF THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS USING HIGH MOLECULAR FLOCULAR

L.R. Asfandiyarova, G.V. Khakimova, V.M. Ilyin

Institute of Chemical Technology and Engineering
FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University»
RF, Sterlitamak, Oktyabrya St., 2

In the course of a laboratory study, the possibility of increasing the degree of wastewater treatment from copper ions by adding iron-containing compounds to the drain was studied. Two series of experiments were carried out: in the first one, the ratio of iron and copper content was experimentally increased, in the second one, the flow temperature was increased to 65ºC. The optimal dose and process conditions were established to ensure the maximum efficiency of purification from heavy metal ions.
Keywords: waste water, heavy metals, flocculation, coprecipitation, dose, efficiency, high molecular weight flocculant.

REFERENCES

1. *Savel'ev S.N., Savel'eva A.V., and Fridland S.V.* Issledovanie koagulyacionno-flokulyacionnoj ochistki stochnoj vody proizvodstva organicheskogo sinteza (Study of coagulation-flocculation wastewater treatment of organic synthesis production). *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2018, Vol. 21, No. 1, pp. 173–176.

2. *Savel'ev S.N., Savel'eva A.V., and Fridland S.V.* Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti (Life safety). 2015, 1, pp. 40−44.

3. *Asfandiyarova L.R., Khakimova G.V., and AIslamutdinova A.* Features of sewage sludge dewatering process at the use of flocculant based on epichlorohydrin and dimethylamine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 839(4), 042093.

4. *Asfandiyarova L.R. and Khakimova G.V.* Ochistka stochnyh vod ot vzveshennyh veshchestv (Materials of the XVII International scientific and practical Conference Science without borders–2021, March 30–April 7, 2021: Sheffield. Science and education LTD, pp. 11–14.

5. *Salov V.N. and Susyaeva M.YU.* Ekonomicheskie i tekhnologicheskie aspekty sinteza polimernyh flokulyantov i innovacionnye tekhnologii polimerizacii (Economic and technological aspects of the synthesis of polymeric flocculants and innovative polymerization technologies). *Voda: ekologiya i tekhnologiya: Tezisy*, 2000, IY Mezhdunarodnyj congress, Moscow, pp. 416.

6. *Gandurina L.V.* Sovremennye sposoby povysheniya kachestva pit'evoj vody (Modern ways to improve the quality of drinking water). Inzhenernoe obespechenie ob"ektov stroitel'stva: Obzornaya informaciya. VNIINTPI. Moscow, 2003, Vol. 4, pp. 59.

7. *Asfandiyarova L.R. and Khakimova G.V.* Primenenie sinteticheskih flokulyantov dlya intensifikacii ochistki stochnyh vod (Using of synthetic flocculants for the intensification of wastewater treatment). Materiali za XVII mezhdunarodna nauchna praktichna konferenciya, B"deshchiteizsledvaniya–2022, 17–25 February, 2022: Sofiya, «ByalGRAD-BG», pp. 21–23.

8. *Asfandiyarova L.R. and Hakimova G.V.* Verwendung von Flockungsmittel fur die Abwasserbehandlung der Produktion von Soda. *Problemy nauchnoj mysli*, 2021, Vol. 4, No. 2, pp. 16–18.

УДК 57.087:[582.26/.27:581.143]+574.5 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-93-97

УСТРОЙСТВО ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРНЫХ ГРУПП МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ И ИНДИКАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В ВОДОЕМАХ

А.С. Гулин[1], Р.П. Тренкеншу[1], А.О. Дыкман[2]

[1]ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»
РФ, г. Севастополь, ул. Нахимова, 2
E-mail: gulins_gent@mail.ru
[2]Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Рассмотрены различные системы для культивирования, обоснована перспективность систем на основе плавающих культиваторов. Разработана гибридная конструкция открытого пруда и закрытого фотобиореактора, эффективная и простая в эксплуатации и рассматриваемая в качестве индикаторной для экологического мониторинга водоемов и как эффективный накопитель биомассы. Устройство относится к оборудованию для культивирования микроводорослей и может быть использовано в биотехнологии и в исследовательской практике для изучения новых перспективных видов микроводорослей, а также как средство для изучения фаготрофии.
Ключевые слова: культиватор, фотобиореактор, плавающий культиватор, микроводоросли.

Поступила в редакцию: 19.09.2022. После доработки: 26.09.2022

Введение. Микроводоросли обладают большим потенциалом для эффективного производства больших объемов биомассы, используемых как в фармакологии, так и для изготовления качественных продуктов питания, кормов, топлива и химикатов, а также для очистки сточных вод [1, 2]. Однако широкое применение технологий для массовых товаров требует значительных затрат на производство биомассы микроводорослей, что может быть сдерживающим фактором в развитии данного научно-практического направления.

Производство биомассы микроводорослей заключается в синтезе их клетками белков, углеводов, липидов, витаминов и других биологически ценных соединений из углекислого газа, соды, воды и минеральных солей, находящихся в питательной среде, с помощью энергии света [3].

Обычно производство биомассы микроводорослей проходит в режиме фототрофного культивирования с использованием света в качестве источника энергии и неорганического углерода в качестве источника углерода. Проблемы фототрофного культивирования полностью отличаются от проблем гетеротрофных процессов, потому что эффективность фототрофного культивирования ограничена плотностью энергии поступающего солнечного света и поступлением неорганического углерода.

Одной из широко распространенных технологий культивирования биомассы водорослей являются фотобиореакторы.

При производстве биомассы микроводорослей процесс культивирования составляет наиболее значительную часть производственных затрат [4]. Другие производственные затраты связаны со сбором биомассы, ее обезвоживанием, сушкой и последующей переработкой.

Таким образом, разработка технологий культивирования микроводорослей с низкими производственными и эксплуатационными затратами является ключом к решению проблемы широкого производства биомассы микроводорослей.

В процессе культивирования микроводорослей обычно используют две системы: открытые пруды и закрытые фотобиореакторы.

В настоящее время открытые пруды широко используются для производства биомассы микроводорослей из-за низких

производственных и эксплуатационных затрат. Однако эта система имеет недостатки, связанные с большими объемами используемой воды и площади земли, а также низкой плотностью клеток микроводорослей [5].

Основным недостатком является низкая продуктивность (<10,0г/м2 в день). Например, *Spirulina* имеет самый большой объем производства среди коммерческих видов микроводорослей, но ее продуктивность в открытых водоемах колеблется от 8,73 до 14,2 т/га год. Таким образом, открытые пруды не позволяют реализовать преимущества высокой продуктивности микроводорослей.

Закрытые биореакторы обычно имеют гораздо более высокую производительность (>20,0 г/м^2 день) и плотность клеток (>2 г/л), чем открытые пруды.

В таких системах существует возможность достижения высокой производительности по биомассе, а также создания стерильных условий для выращивания монокультуры водорослей, однако затраты на изготовление, эксплуатацию и техническое обслуживание слишком высоки [6].

На современном этапе наиболее перспективной системой являются плавающие фотобиореакторы, т.к. обладают большим потенциалом при производстве биомассы микроводорослей при гораздо меньших затратах, чем традиционные системы культивирования, поскольку имеют низкие затраты на изготовление, эксплуатацию и техническое обслуживание [7].

Плавающие фотобиореакторы размещаются непосредственно на поверхности воды, им не требуется почва, а энергия волн обеспечивает бесплатную энергию перемешивания. Кроме того, окружающая вода может использоваться для контроля температуры культуры и снабжения питательными веществами для роста микроводорослей.

В данной работе предлагается конструкция устройства для культивирования микроводорослей в естественных условиях, что позволяет обеспечить выращивание в открытом водоеме микроводорослей в естественных условиях, с возможностью выделения новых перспективных видов, обладающих высокой скоростью роста при минимальных затратах. В перспективе устройство может быть использовано в иных научно-практических исследованиях, в т.ч. и в экомониторинге.

Описание установки. Устройство для культивирования микроводорослей в естественных условиях, представляет собой гибридную конструкцию открытого пруда и закрытого фотобиореактора, что позволяет совмещать преимущества этих указанных систем.

В основе конструкции – контейнер, выполненный из дерева и имеющий форму параллелепипеда,

В нижней части устройства установлена сетка из мельничного газа с ячейками, имеющими размер 0,02–0,2 мм, который выбирают в зависимости от вида культивируемых водорослей. Сетка обеспечивает беспрепятственное попадание воды из водоема внутрь культиватора. А благодаря тому, что размер ее ячейки меньше размеров клетки микроводорослей, она удерживает микроводоросли внутри устройства.

Возможность выбора размеров ячейки позволяет удерживать в культиваторе более крупные клетки, которые могут питаться более мелкими клетками, поступающими из окружающей водной среды. Это, в свою очередь, в перспективе позволит изучать процессы фаготрофии.

Для защиты технологического объема контейнера от попадания брызг и мусора с водной поверхности, по периметру устройства закреплен каркас с защитным тентом. В качестве тента используется прозрачный полиэтилен, характеризующийся высокой светопропускающей способностью.

Использование дерева в конструкции позволяет обеспечить поддержание ее положительной плавучести, без применения дополнительной поплавковой системы, что существенно снижает производственные затраты.

Конструкция поясняется чертежами, представленными на рис. 1, где схематично изображено устройство.

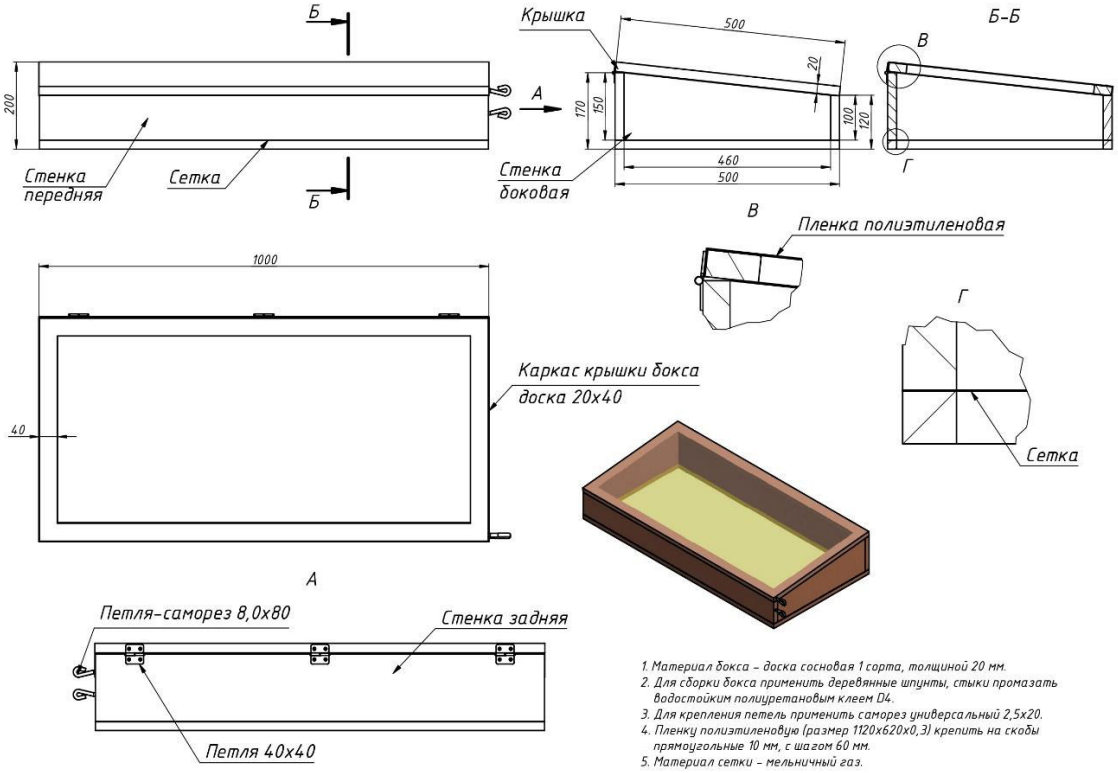


Рис. 1. Общий вид устройства для культивирования микроводорослей в естественных условиях

Fig. 1. General view of a device for cultivating microalgae in natural conditions

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на рост микроводорослей, является перемешивание жидкости в технологическом объеме [8]. Данный процесс выполняет следующие очень важные функции в культивировании микроводорослей:

– равномерное распределение клеток микроводорослей в культиваторе;

– усиление газообмена;

– постоянное поступление питательных веществ из воды водоема;

– охлаждение и поддержание постоянного температурного режима в культиваторе;

– быстрое перемещение клеток водорослей между темными и светлыми зонами на пути света, что может значительно увеличить продуктивность биомассы.

Таким образом, продуктивность роста микроводорослей можно повысить за счет увеличения интенсивности перемешивания, если этот процесс не будет вызывать повреждения клеток водорослей.

В предлагаемой конструкции для снижения стоимости изготовления и эксплуатации, а также в целях отказа от использования электрического оборудования в процессе культивирования в качестве системы перемешивания используется энергия волн.

Для работы устройства его устанавливают на поверхность водоема в прибрежной зоне морской акватории.

В контейнер помещают культуру выращиваемых микроводорослей. Крышка защитного тента закрывается и фиксируется посредством пластиковых стяжек. Под действием силы тяжести устройство погружается в воду до рабочего уровня, после чего глубина слоя жидкости над дном достигает 80–90 мм.

По завершению цикла выращивания микроводорослей, устройство транспортируется на берег для последующей разгрузки. При извлечении устройства из

воды, жидкая среда выливается через сетку, а биомасса водорослей остается в контейнере культиватора. После открытия крышки с защитным тентом, биомасса извлекается и отправляется на дальнейшую переработку.

Перед повторным использованием производится очистка и дефектовка (проверка состояния) устройства.

По итогам разработки устройства, был проведен практический эксперимент (апробация). Культиватор эффективной площадью 0,5 м^2, с размером ячейки сетки 0,26 мм, был установлен на поверхность акватории в прибрежной зоне Черного моря. После заполнения морской водой, в культиватор была помещена смесь культур диатомовых микроводорослей. Так для проведения эксперимента использовались культуры *Striatella unipunctata, Licmophora abbreviata, Cylindrotheca closterium*.

Цикл выращивания культур микроводорослей продолжался 30 суток в осенний период. В процессе эксперимента проводили ежедневный контроль температуры морской воды и измерение уровня освещенности.

После завершения цикла выращивания и извлечения устройства из воды, было получено 510 г сырой биомассы диатомовых микроводорослей. После высушивания, было получено 42 г сухой биомассы.

Перспективы использования предлагаемого устройства. Предлагаемое устройство позволяет получать некоторые экологические характеристики (индикаторы), а также несет потенциальные возможности, которые могут быть использованы в биотехнологии и в исследовательской практике для изучения новых перспективных видов микроводорослей, обладающих высокой скоростью роста, для получения биологически ценных веществ, а также как средство для изучения фаготрофии.

Поскольку оценка полученной в ходе культивирования биомассы отражает экологическую ситуацию в водоеме, т.е. наличие питательных веществ и отсутствие токсического воздействия возможных загрязнителей антропогенного происхождения, то устройство может быть предложено в качестве индикаторной системы при проведении комплексного экомониторинга.

Заключение. Разработанное устройство для культивирования микроводорослей в естественных условиях, имеет большие преимущества по сравнению с закрытыми фотобиореакторами и открытыми прудами, включая низкие производственные затраты и эксплуатационные расходы, а также отсутствие необходимости и требований к наличию земли.

Применение в устройстве не герметичного дна из мельничного газа позволяет эксплуатировать фотобиореактор без дополнительных систем аэрации или перемешивания, а использование для этих целей энергии волн, значительно снижает эксплуатационные расходы, в т.ч. и на техническое обслуживание.

Описанное устройство предположительно может быть использовано и в качестве индикаторной системы в ходе экологического мониторинга (по оценке нарастания биологической массы культивируемой индикаторной микроводоросли, особенно требовательной к условиям среды), так и в целом для оценки первичной продукции водоема.

Выращивание микроводорослей в акватории моря – многообещающее решение для простого (использование доступного в создании и эксплуатации устройства), экономного и эффективного производства биомассы, которая используется во многих отраслях, в т.ч. в медицине, фармакологии, ветеринарии и пищевой промышленности.

Работа выполнена на базе ЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ, в рамках темы госзадания № 121030300149-0 «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Курс* низших растений. М.: Высшая школа, 1981. 520 с.

2. *Минюк Г.С., Дробецкая И.В., Чубчикова И.Н., Терентьева Н.В.* Одноклеточные водоросли как возобновляемый биологический ресурс: обзор // МЭЖ. 2008. № 2. С. 5–23.

3. *Водоросли.* Справочник. Киев, 1989. С. 608.

4. *Kim J*. Methods of downstream processing for the production of biodiesel from microalgae // Biotechnology Advances. 2013. Vol. 31. P. 862–876.

5. *Kumar K*., *Mishra S.K., Shrivastav A., Park M.S., Yang J-W.* Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds // Renewable Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 51. P. 875–885.

6. *Acien F.G., Fernandez J.M., Magan J.J., Molina E.* Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it // Biotechnology Advances. 2012. Vol. 30. P. 1344–1353.

7. *Dogaris I., Welch M, Meiser A, Walmsley L, Philippidis G.* A novel horizontal photobioreactor for high-density cultivation of microalgae // Bioresource Technology. 2015. 198:316–324.

8. *Лелеков А.С*., *Тренкеншу Р.П.* Простейшие модели роста микроводорослей. 4. Экспоненциальная и линейная фазы роста // Экология моря. 2007. № 74. С. 47–49.

SETUP FOR CULTIVATING MICROALGAER OF DIFFERENT SIZE GROUPS IN NATURAL CONDITIONS AND ESTIMATING THE ENVIRONMENTAL SITUATION IN WATER BODIES

A.S. Gulin[1], R.P. Trenkenshu[1], A.O. Dykman[2]

[1]The A.O. Kovalevsky Institute of Biology of Southern Seas of RAS,
RF, Sevastopol, Nachimov Av., 2
[2]Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

Various systems for cultivation are considered, the prospects of systems based on floating cultivators are substantiated. A hybrid design of an open pond and a closed photobioreactor is developed, which is efficient and easy to operate and can be used both for ecological monitoring of water bodies and as an effective biomass accumulator. The setup belongs to the equipment for cultivating microalgae and can be used in biotechnology and research practice to study new promising species of microalgae, as well as a tool for studying phagotrophy.
Keywords: cultivator, photobioreactor, floating cultivator, microalgae.

REFERENCE

1. *Kurs* nizshikh rasteniy Course of lower plants. Moscow: Vysshaya shkola, 1981. 520 p.

2. *Minyuk G.S., Drobetskaya I.V., Chubchikova I.N., and Terent'yeva N.V.* Odnokletochnyye vodo rosli kak vozobnovlyayemyy biologicheskiy resurs: obzor (Unicellular algae as a renewable biological resource: a review). MEZH, 2008. No. 2, pp. 5–23.

3. *Vodorosli*. (Seaweed). Spravochnik. Kyiv, 1989, 608 p.

4. *Kim J*. Methods of downstream processing for the production of biodiesel from microalgae. Biotechnology Advances, 2013, Vol. 31, pp. 862–876.

5. *Kumar K*., *Mishra S.K., Shrivastav A., Park M.S., and Yang J-W.* Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2015, Vol. 51, pp. 875–885.

6. *Acien F.G., Fernandez J.M., Magan J.J., and Molina E.* Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. Biotechnology Advances, 2012, Vol. 30, pp. 1344–1353.

7. *Dogaris I*., *Welch M, Meiser A, Walmsley L, and Philippidis G.* A novel horizontal photobioreactor for high-density cultivation of microalgae. Bioresource Technology, 2015, 198:316–324.

8. *Lelekov A.S. and* Trenkenshu R.P. Prostejshie modeli rosta mikrovodoroslej. 4. Eksponencial'naya i linejnaya fazy rosta (The simplest models of microalgae growth. 4. Exponential and linear growth phases). *Ecology of the sea*, 2007, No. 74, pp. 47–49.

УДК 621.43.052 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-98-103

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГОУСТАНОВОК РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА БАЗЕ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

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

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

Исследованы энергетические и экологические характеристики газотурбинных установок (ГТУ) для объектов распределенной энергетики в режиме когенерации. Показано, что пропорционально экономии топлива уменьшаются вредные выбросы. При комбинированном производстве энергии затраты топлива требуются только на ГТУ, а тепловую мощность получают за счет утилизации теплоты выхлопных газов двигателя, в этом случае суммарно выброс продуктов сгорания (парниковых газов) будет меньше на 35,5–41%, чем при раздельном производстве этих видов энергии.
Ключевые слова: газотурбинный двигатель, когенерация, котел-утилизатор, продукты сгорания, вредные выбросы, парниковые газы

Поступила в редакцию: 13.10.2022. После доработки: 27.10.2022

Введение. Наряду с созданием и реконструкцией крупных базовых энергетических комплексов в настоящий момент приобретает направление по разработке и реализации объектов распределенной энергетики.

Если при базовой энергетике производство электрической и тепловой энергии осуществляется в основном раздельно, то на объектах распределенной энергетики энергию можно производить в комбинированном виде, так как генерирующие мощности расположены в непосредственной близости от потребителей.

Эффект экономии топлива в комбинированной установке по сравнению с раздельным производством того же количества теплоты и электроэнергии достигается за счет замещения части топлива, сжигавшегося в котле, энергией, утилизируемой из отработавших газов двигателя газотурбогенератора.

Таким образом, пропорционально экономии топлива уменьшаются вредные выбросы, состоящие из окислов азота и углерода, а также уменьшается количество продуктов сгорания топлива, основными компонентами которых являются двуокись углерода и пары воды.

Соответственно, продукты сгорания углеводородного топлива являются парниковыми газами, влияющими на изменение климата, увязанного как с географическим положением той или иной страны, так и Земли в целом.

На основании международных соглашений в РФ был принят Федеральный закон от 02.07.2021 г. № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [1]. Следом выходит в свет Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 г. № 3052-р «Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» [2] (далее – Стратегия).

Стратегией предусматриваются ряд мер по ее реализации, из которых в энергетике в частности:

– развитие распределенной генерации (в том числе в изолированных энергосистемах) с учетом необходимости сохранения стабильности функционирования единой энергосистемы;

– снижение энергетических и материальных затрат, применение энергоэффективных технологий (парогазовые установки, комбинированная выработка электричества и тепла) и так далее.

То есть, особое внимание планируется уделять повышению энергоэффективности, что является одним из ключевых

факторов экономии энергоресурсов и сокращения объема выброса парниковых газов.

Объекты распределенной энергетики создаются на базе газотурбинных двигателей (ГТД) и поршневых двигателей. ГТД для электроэнергетики производятся в РФ на основе освоенного промышленностью России производства авиационных и корабельных двигателей и обладают необходимым диапазоном мощностей.

По мощности ГТД можно разделить на следующие группы:

1. Мощностью от 2,5 до 4 МВт;
2. Мощностью от 6 до 8 МВт, освоена рядом отечественных предприятий;
3. Мощностью от 10 до 13 МВт;
4. Мощностью от 16 до 25 МВт.
5. Мощностью от 25 МВт и выше.

Выбор группы определяется муниципальным или промышленным образованием, а также изолированной энергосистемой.

Законом «Об электроэнергетике» ограничивается количество поставляемой электроэнергии в розницу мощностью 25 МВт [3].

Характеристики энергоустановок различного состава для распределенной энергетики. Анализ энергетических и экологических характеристик можно произвести, выбрав освоенные ОАО «Пермский моторный завод» разработки АО «ОДК Авиадвигатель» ГТД для выработки электроэнергии ГТУ-16П [4].

Мощность на валу силовой турбины составляет 16,4 МВт; КПД эффективный – 37%; расход воздуха за силовой турбиной – 56,2 кг/с; температура газа за силовой турбиной – 743 К.

При раздельном производстве энергии выберем котел для системы теплоснабжения мощностью 21 МВт. Такую тепловую мощность можно получить, утилизируя тепло выхлопных газов от ГТУ-16П (рис. 1).

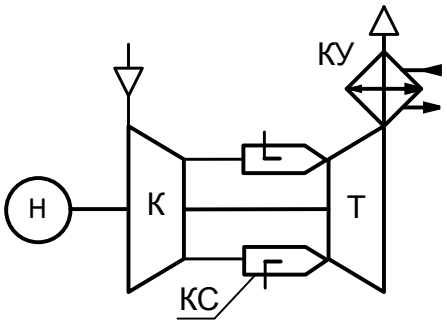


Рис. 1. Схема когенерационной ГТУ:
К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; Н – нагрузка; КУ – котел-утилизатор
Fig. 1. Schematic of a gas turbine cogeneration plant:
К – compressor; КС – combustion chamber; Т – turbine; Н – load; КУ – recovery boiler

По данным изготовителей ГТУ-16П расход топлива (природный газ – метан CH_4) составляет 3181,6 кг/ч, а водогрейный котел (ВК) мощностью 21 МВт – 1751,4 кг/ч подобный по экономичности котлу ТВГМ-30. Суммарно расход топлива равен 4933 кг/ч.

Соответственно, при работе ГТУ-16П и расходе топлива 3181,6 кг/ч в продуктах сгорания содержится CO_2 – 8757,6 кг/ч, паров воды – 7158,6 кг/ч.

Водогрейный котел (ВК) мощностью 21 МВт расходует топлива (природный газ) 1751,4 кг/ч, в продуктах сгорания которого содержится CO_2 – 4821 кг/ч, паров воды H_2O – 3948,6 кг/ч. Суммарно продуктов сгорания 24677 кг/ч.

В более экономичном сочетании ГТУ с утилизационной паротурбинной установкой (ПТУ) мощностью 16,4 МВт и водогрейным котлом мощностью 21 МВт расход топлива на ГТУ+ПТУ составит 2565,1 кг/ч, а на ВК мощностью 21 МВт также 1751,4 кг/ч и суммарно расход топлива составит 4316,4 кг/ч (рис. 2). Содержание CO_2 и H_2O в про-

дуктах сгорания при раздельном производстве энергии сгорания в ГТУ+ПТУ и ВК приведены в табл. 1.

Таким образом, при раздельном производстве электроэнергии и тепла максимальные выбросы CO_2 (B_{max}) составят 13578,9 кг/ч (см. табл. 1). При комбинированном производстве тепла и электроэнергии снижение выбросов (относительный расход CO_2 – $B_{отн}$) можно оценить из отношения

$$B_{отн} = B_к / B_{max},$$

где $B_к$ – суммарные выбросы CO_2 установки, работающей в режиме комбинированной выработки энергии.

Очевидно, что при раздельной выработке электроэнергии и тепла $B_к = B_{max}$. Таким образом, можно утверждать, что с понижением $B_{отн}$ возрастает экологичность установки.

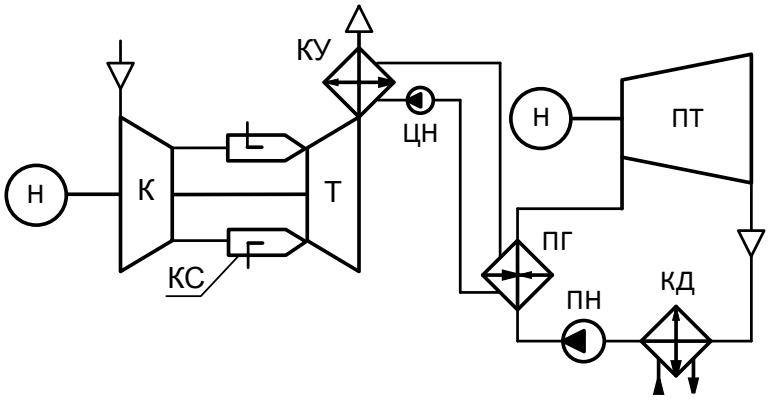


Рис. 2. Схема когенерационной ГТУ с утилизационной ПТУ:
Н – нагрузка; К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; КУ – котел-утилизатор;
ЦН – циркуляционный насос; ПТ – паровая турбина; КД – конденсатор;
ПН – питательный насос; ПГ – парогенератор
Fig. 2. Schematic diagram of a cogeneration GTP based on a STP:
Н – load; К – compressor; КС – combustion chamber; Т – turbine; КУ – recovery boiler;
ЦН – circulation pump; ПТ – steam turbine; КД – condenser; ПН – feed pump; ПГ – steam generator

Таблица 1. Технические и экологические характеристики энергоустановки, состоящей из ГТУ мощностью 16,4 МВт и водогрейных котлов – 21 МВт

Состав энергоустановки	Расход топлива, кг/ч	Выбросы CO_2, кг/ч	Выбросы H_2O, кг/ч	$B_{отн}$
ГТУ и водогрейный котел (ВК)	4933,0	13578,9	11099,9	1,000
ГТУ+ПТУ и ВК	4316,4	11881,2	9719,8	0,875
ГТУ+УК (утилизационный котел)	3181,6	8757,6	7158,6	0,645

При омбинированном (когекнерационном) производстве энергии затраты топлива требуются только на ГТУ, работающую по простому циклу, а тепловую мощность получаем за счет утилизации теплоты выхлопных газов двигателя [6] В этом случае в ГТУ мощностью 16,4 МВт и, в целом, расход топлива составит те же 3181,6 кг/ч, суммарный выброс продуктов сгорания будет 15916 кг/ч, что на 35,8% меньше, чем при раздельном производстве (см. табл. 1)

Во второй мощностной группе широко, применимой в изолированных системах и реконструкции котельных в теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), используется ГТД-6РМ производства НПО «Сатурн», г. Рыбинск. В ГТД-6РМ мощность на валу силовой турбины – 6,16 МВт; КПД эффективный – 24,3%; расход воздуха за силовой турбиной – 46,1 кг/с; температура газа за силовой турбиной – 423°С; тепловая мощность – 15,26 МВт; расход топлива (природный газ) – 1830 кг/ч. При раздельном производстве энергии в ВК расход топлива составляет – 2919 кг/ч при мощности котла – 15,26 МВт. Суммарный выброс продуктов сгорания составляет 15516 кг/ч.

При когенерационном производстве энергии в ГТД-6РМ+УК суммарные выбросы продуктов сгорания составляют 9150 кг/ч, что на 41% меньше, чем при раздельном производстве энергии (табл. 2).

В перспективе в комбинации ГТУ+УК вместо котла-утилизатора на выхлопе двигателя можно установить турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ), который состоит из турбины перерасширения, дожимающего компрессора и охладителя газа между ними (рис. 3). Установка ГТУ+ТКУ является когенерационной, так как охладитель газа используется в качестве котла утилизатора [4]. Так при электрической мощности 16,4 МВт энергоустановка вырабатывает теплоту мощностью 15,9 МВт при этом затраты по топливу – 2833 кг/ч вместо 3181,6 кг/ч в ГТД (см. табл. 1), работающего по простому циклу, а суммарные выбросы продуктов сгорания меньше на 37%.

Таблица 2. Технические и экологические характеристики энергоустановки, состоящей из ГТУ мощностью 6,16 МВт и водогрейного котла – 15,26 МВт

Состав энергоустановки	Расход топлива, кг/ч	Выбросы CO_2, кг/ч	Выбросы H_2O, кг/ч	$B_{отн}$
ГТУ+ВК	4719	8540	6973	1,000
ГТУ+УК	1830	5037	4113	0,590

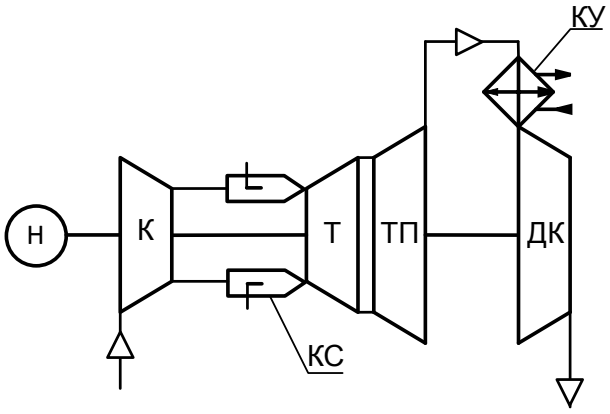


Рис. 3. Схема когенерационной ГТУ с ТКУ:
Н – нагрузка; К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина; КУ – котел-утилизатор;
ТП – турбина перерасширения; ДК – дожимающий компрессор
Fig. 3. Schematic diagram of a cogeneration GTP with a TCU:
Н – load; К – compressor; КС – combustion chamber; Т – turbine; КУ – recovery boiler;
ТП – overexpansion turbine; ДК – buster compressor

Заключение. Проведенное исследование показало, что когенерационные технологии (одновременное производство электрической и тепловой энергии в одной установке) в сочетании с гибкими методами перераспределения энергии между тепловой и электрической является одним из результативных путей повышения эффективности использования топлива на стадии генерирования энергии. При этом уменьшаются выбросы продуктов сгорания и, следовательно, парниковых газов. Показано, что относительный расход CO_2 ($B_{отн}$) является показателем, который адекватно характеризует экологичность энергетического комплекса, обеспечивающего локальный объект.

Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС «Создание научных основ разработки гибких мультигенерационных установок с использованием возобновляемых источников энергии и местных ресурсов холода в условиях климатических изменений» (№ госрегистрации 121122300068-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Федеральный* закон от 02.07.2021 N 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [Электронный ресурс] URL: https://demo.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=doc&ts=BZVi00TBpuKZhZjB&cacheid=4A1C24A69EC6AD7FC94A44309C8B1925&mode=splus&rnd=e5DGWg&base=LAW&n=388992#RwWi00TV0MkGbt8O (дата обращения – 16.09.2022).

2. *Распоряжение* Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 г. № 3052-р. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» [Электронный ресурс] URL: http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf (дата обращения – 16.09.2022).

3. Об электроэнергетике: Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ (в ред. ФЗ от 11 июня 2022 г. № 174-ФЗ) [Электронный ресурс] URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/ (дата обращения – 18.09.2022).

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

5. *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.

6. Теплоэнергетика и теплотехника: справочная серия в 4 книгах, кн.2: Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент // справочник / А.А. Александров и др / М.: Слово, 2007. 561 с.

ENERGY AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF DISTRIBUTED POWER PLANTS BASED ON GAS TURBINE ENGINES

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

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

The energy and environmental characteristics of gas turbine plants (GTU) for distributed energy facilities in coherence are investigated. It is shown that harmful emissions are reduced in proportion to fuel economy. In combined energy production, fuel costs are required only at the GTU, and thermal power is obtained by recycling the heat of engine exhaust gases. In this case, the total emission of combustion products (greenhouse gases) will be 35.5–41% less than with separate production of these types of energy.
Keywords: gas turbine engine, cogeneration, recovery boiler, combustion products.

REFERENCES

1.https://demo.consultant.ru/cgi/online.cgi?req=doc&ts=BZVi00TBpuKZhZjB&cacheid=4A1C24A69EC6AD7FC94A44309C8B1925&mode=splus&rnd=e5DGWg&base=LAW&n=388992#RwWi00TV0MkGbt8O (September 16, 2022).

2. http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf (September 16, 2022).

3. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/ (September 18, 2022).

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

5. *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 heat generating gas turbine plants of complex cycles at rated and variable modes). Nacional'naja Associacija Uchenyh, 2021, No. 64-2(64), pp. 17–22.

6. *Teplojenergetika* i teplotehnika (Heat power Engineering and Heat engineering): spravochnaja serija v 4 knigah, kn.2: Teoreticheskie osnovy teplotehniki. Teplotehnicheskij jeksperiment (oretical Foundations of Heat Engineering. Thermal engineering experiment): spravochnik, A.A. Aleksandrov i dr., Moskow: Slovo, 2007, 561 p.

УДК 504.06:504.4.054 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-104-111

ПРИОРИТЕТНЫЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ И НОРМАТИВЫ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПРИТОКОВ РЕКИ ЧЕРНОЙ

Е.И. Азаренко, Л.И. Осадчая

Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: e.i.azarenko@yandex.ru, lila1809@mail.ru

Выявлены источники поступления и загрязняющие вещества, привносимые в воды притоков р. Черная; проведен анализ результатов наблюдений на пунктах Территориальной системы наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных водных объектов города Севастополя за период с 2016 по 2020 г.; определены вещества, оказывающие существенное влияние на качество воды притоков р. Черная и подлежащие учету в составе нормативов допустимого воздействия для каждого водного объекта; установлены нормативы качества воды для притоков р. Черная по каждому веществу из перечня приоритетных загрязнителей.

Ключевые слова: загрязнение водных объектов, приоритетные загрязнители, нормативы допустимого воздействия, организованный сброс, диффузный сброс, сток с территорий, нормативы качества воды.

Поступила в редакцию: 30.09.2022.

Введение. Качество вод водных объектов формируется под воздействием как природных, так и антропогенных факторов. В этой связи выбор значимых, приоритетных загрязнителей представляет собой сложную задачу и должен основываться на критериях, учитывающих всю совокупность характеристик токсических агентов и особенностей возможного их действия на здоровье населения.

В Севастопольском регионе наиболее значительной по протяженности и водности является р. Черная, в которую впадает 11 притоков с разнообразным режимом питания и уровнем загрязнения.

Цели и задачи. Сохранение качества вод и природной экосистемы указанных водных объектов связано с ограничением допустимого воздействия на них. Этой цели можно достичь последовательным решением ряда задач, рассмотренных в ходе исследований:

– выявление источников поступления загрязняющих веществ, привносимых в воды притоков р. Черная;

– анализ результатов наблюдений за состоянием и загрязнением рассматриваемых водных объектов, а также р. Черная на пунктах Территориальной системы наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных водных объектов города Севастополя за период с 2016 по 2020 г.;

– определение веществ, оказывающих существенное влияние на качество воды притоков р. Черная и подлежащих учету в составе нормативов допустимого воздействия для каждого водного объекта;

– анализ требований действующих нормативных правовых актов Российской Федерации по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты и установление нормативов качества воды для притоков р. Черная по каждому веществу из перечня приоритетных загрязнителей.

Основная часть. Критериями определения перечня приоритетных веществ, для которых требуется установление нормативов допустимого воздействия (НДВ) на водные объекты, являются:

– антропогенный привнос их в водный объект со сточными водами или другими способами в настоящее время или в перспективе;

– превышение концентраций этих веществ в воде водных объектов над ПДК, зафиксированное в течение по-

следних пяти лет.

Основная часть водосборных территорий притоков р. Черная расположена в пределах заказника «Байдарский». Фактическое использование рассматриваемых водных объектов осуществляется в следующих целях:

1. Забор воды для гидромелиорации земель:

– из пруда без названия южнее с. Терновка (бассейн р. Ай-Тодорка);

– из пруда «Дачный» в б. Кизиловая (бассейн р. Байдарка);

– из прудов «Верхний» и «Нижний» на р. Уппа.

2. Забор воды ООО «Орлиновское охотничье хозяйство» на производственные нужды (техническая вода) – в настоящее время договоры не действуют:

– из пруда «Торопова дача» (р. Сухая Речка);

– из р. Сухая Речка.

3. Рекреация.

4. Любительское и спортивное рыболовство.

5. Сброс сточных вод.

Привнос химических и взвешенных веществ в притоки р. Черная осуществляется от трех типов источников:

1. Организованный сброс сточных вод:

– КОС № 5 на расстоянии 1,275 км от устья р. Байдарка (с. Озерное);

– КОС № 8 в Хайтинский водоток и далее в р. Байдарка (с. Тыловое).

2. Диффузные неорганизованные сбросы:

– в реку Ай-Тодорка осуществляется сброс сточных вод без очистки от ряда административных и жилых зданий в с. Терновка;

– в реку Байдарка осуществляется сброс сточных вод без очистки от многоквартирного жилого фонда, больницы в с. Орлиное.

3. Сток с территорий:

– поверхностный сток с селитебных территорий;

– поверхностный сток с сельскохозяйственных угодий.

Состав загрязнений представлен в табл. 1, в которой использованы следующие обозначения:

[1] – Министерство экономического развития Российской Федерации. Федеральная служба государственной статистики. Приказ Росстата от 27 декабря 2019 года N 815 «Об утверждении формы федерального статистического наблюдения с указаниями по ее заполнению для организации Федеральным агентством водных ресурсов федерального статистического наблюдения об использовании воды» (с изменениями на 12 марта 2020 года).

[2] – по данным Департамента природных ресурсов и экологии города Севастополя, №3938/01-22-01-63/02/21 от 02.08.2021.

[3] – Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 N 644 (ред. от 22.05.2020) "Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации" (за исключением тяжелых металлов и ЛОС, не характерных для коммунально-бытовых стоков).

[4] – Методическое пособие «Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты». Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве», Москва, 2015.

[5] – При наличии мониторинга почвенного покрова фактическая масса смыва почвы и содержание загрязняющих веществ в ней принимаются по его результатам, в условиях отсутствия данных к основным загрязняющим веществам, поступающим с распаханных территорий, отнесены взвешенные вещества, биогенные элементы и нефтепродукты.

[6] – анионные синтетические поверхностно-активные вещества.

[7] – неионогенные синтетические поверхностно-активные вещества.

Таблица 1. Источники поступления и перечень загрязняющих веществ, привносимых в исследуемые водные объекты

№ п/п	Загрязняющее вещество (показатель)	Код[1]	Источники поступления ЗВ в водные объекты водохозяйственного участка 21.01.00.003 в пределах территории города федерального значения Севастополь					
			Точечные источники организованного сброса сточных вод		Потенциально управляемые диффузные источники загрязнения		Неуправляемые диффузные источники загрязнения	
			КОС №5 ГУПС "Водоканал" на расстоянии 1,275 км от устья р. Байдарка (с. Озерное)[2]	КОС №8 ГУПС "Водоканал" в Хайтинский водоток и далее в р. Байдарка (с. Тыловое)[2]	Неорганизованные сбросы от административных и жилых зданий в с. Терновка без очистки[3]	Неорганизованные сбросы от многоквартирного жилого фонда и больницы в с. Орлиное без очистки[3]	Поверхностный сток с селитебных территорий[4]	Поверхностный сток с сельскохозяйственных угодий[5]
1.	Нитраты	**28**	+	+	+	+	+	+
2.	Нитриты	**29**	+	+	+	+	+	+
3.	Сульфаты	**40**	+	+	+	+	–	+
4.	Фосфаты (по фосфору)	**90**	+	+	+	+	+	+
5.	ХПК	**70**	+	+	+	+	+	+
6.	Хлориды	**52**	+	+	+	+	–	+
7.	Цинк	**55**	+	+	+	+	–	–
8.	АСПАВ[6]	**135**	+	+	+	+	–	–
9.	Алюминий	**1**	+	+	+	+	–	–
10.	Аммоний-ион	**3**	+	+	+	+	+	+
11.	$БПК_{полн.}$	**132**	+	+	+	+	+	+
12.	Взвешенные вещества	**113**	+	+	+	+	+	+
13.	Железо	**13**	+	+	+	+	–	+
14.	Жиры (природного происхождения)	**14**	+	+	+	+	–	–
15.	Марганец	**21**	+	+	+	+	–	–
16.	Медь	**22**	+	+	+	+	–	–
17.	НСПАВ[7]	**36**	+	+	+	+	–	–
18.	Нефтепродукты	**80**	+	+	+	+	+	+
19.	Никель	**27**	+	+	+	+	–	–

Анализ результатов наблюдений за состоянием и загрязнением рассматриваемых водных объектов, а также р. Черная за период с 2016 по 2020 г. на пунктах Территориальной системы наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных водных объектов города Севастополя (по данным Департамента природных ресурсов и экологии города Севастополя) позволил выделить две группы веществ, оказывающих существенное влияние на качество воды притоков р. Черная (табл. 2):

– вещества, концентрации которых превышают рыбохозяйственные и/или гигиенические нормативы;

– вещества, концентрации которых превышают пороговый уровень 0,5 ПДК.

В результате был сформирован перечень веществ (показателей), подлежащих учету в составе нормативов допустимого воздействия для каждого водного объекта водохозяйственного участка 21.01.00.003 (притоков реки Черная) в пределах территории города федерального значения Севастополь (табл. 2).

Дополнительно в состав учитываемых загрязняющих веществ включены взвешенные вещества, ввиду их большого экологического значения и фосфаты, определяющие процессы эвтрофикации.

Из учитываемых веществ для притоков р. Черная к ксенобиотикам были отнесены нефтепродукты и АПАВ (АСПАВ). Остальные вещества (показатели) отнесены к соединениям двойного генезиса.

Качество воды характеризуется показателями состава и свойств воды, определяющими пригодность ее для конкретных целей водопользования и/или устойчивого функционирования экологической системы водного объекта. При их соблюдении удовлетворяются нормативные требования использования по приоритетным видам водопользования, обеспечивается устойчивое функционирование естественных экологических систем водного объекта и сохраняется биологическое разнообразие.

Согласно п. 10. приказа МПР РФ от 12.12.2007 № 328 [1], нормативы качества воды для поверхностных водных объектов устанавливаются исходя из:

1) отнесения водных объектов к определенной группе:

– природным водным объектам, воздействие антропогенной нагрузки на которые не привели к изменению их основных гидрологических и морфологических характеристик;

– природным водным объектам, которые в результате человеческой деятельности подверглись физическим изменениям, приведшим к существенному изменению их основных характеристик (русловые водохранилища, озера-водохранилища, спрямленные (канализованные) участки рек, природные водоемы и водотоки, трансформированные в технологические водоемы, и др.);

– водным объектам, созданным в результате деятельности человека там, где ранее естественных водных объектов не существовало;

2) происхождения загрязняющего вещества:

– искусственного происхождения, ксенобиотики (для ксенобиотиков, а также высокоопасных веществ нормативы качества воды принимаются в зависимости от целевого использования водных объектов равными рыбохозяйственным или гигиеническим нормативам предельно допустимых концентраций (ПДК));

– двойного генезиса, т.е. распространенных в природных водах как по естественным причинам, так и в результате антропогенного воздействия (нормативы качества воды могут приниматься равными нормативам предельно допустимых концентраций химических веществ, которые определяются с учетом регионального естественного (условно-естественного) гидрохимического фона дифференцированно для конкретных типов водных объектов);

3) условий целевого использования водных объектов и их приоритетности при комплексном использовании:

– целевое назначение водного объекта или его участка (или приоритетное использование водного объекта) определяется действующим законодательством;

Таблица 2. Группы веществ, оказывающих существенное влияние на качество воды притоков р. Черная и подлежащих учету в составе нормативов допустимого воздействия на водные объекты

№ п/п	Водный объект	Показатели, по которым регистрировалось превышение 1 ПДК (по наиболее жесткому нормативу), для периода наблюдений 2016-2020 гг.	Показатели, по которым регистрировались значения от 0,5 до 1 ПДК (исключая вещества, учтенные в графе 3), для периода наблюдений 2016-2020 гг.	Дополнительные показатели
1	р. Арманка	БПК5, Нитриты, Фенолы, Медь, Марганец	Железо общее, Магний	Взвешенные вещества, Фосфаты
2	р. Календа	БПК5, Нитриты, Фенолы, Железо общее, Марганец, Медь	Кальций	Взвешенные вещества, Фосфаты
3	р. Боса	БПК5, Сульфаты, Нитриты, Фенолы, Железо общее, Медь	Кальций, Магний	Взвешенные вещества, Фосфаты
4	р. Бага Нижняя	БПК5, Нитриты, Железо общее, Марганец, Медь, Фенолы	–	Взвешенные вещества, Фосфаты
5	р. Бага Верхняя	БПК5, Нитриты, Железо общее, Марганец, Медь, Фенолы	–	Взвешенные вещества, Фосфаты
6	р. Уркуста	БПК5, Фенолы, Марганец, Медь, Нитриты	Аммоний-ион, Железо общее	Взвешенные вещества, Фосфаты
7	р. Уппа	БПК5, Фенолы, Железо общее, Нитриты, Магний, Марганец, Медь	Аммоний-ион, Сульфаты, Фосфаты	Взвешенные вещества
8	р. Ай-Тодорка	БПК5, Фенолы, Нитриты, Магний, Медь, Железо общее, Марганец	Аммоний-ион, Сульфаты, Кальций	Взвешенные вещества, Фосфаты
9	р. Сухая речка	БПК5, Фенолы, Нитриты, Железо общее, Медь, Магний	Марганец	Взвешенные вещества, Фосфаты
10	р. Байдарка	БПК5, Фенолы, Железо общее, Нитриты, Фосфаты, Нефтепродукты, АПАВ, Аммоний-ион, Никель, Марганец, Медь, Цинк	Кальций	Взвешенные вещества
11	р. Узунджа	БПК5, Железо общее, Медь	Марганец, Фенолы	Взвешенные вещества, Фосфаты

– в случае комплексного использования водного объекта при отсутствии установленных приоритетов для расчета НДВ принимаются наиболее жесткие нормы качества воды для имеющихся на водном объекте видов водопользования.

В качестве нормативов качества воды могут приниматься:

– предельно допустимые концентрации для химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (гигиенические ПДК, согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [2]. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, воде плавательных бассейнов, аквапарков);

– предельно допустимые концентрации для химических веществ в воде водных объектов рыбохозяйственного значения (рыбохозяйственные ПДК, согласно приказу Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13 декабря 2016 года № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изменениями на 10 марта 2020 года) [3]);

– ориентировочно допустимые уровни (ОДУ) химических веществ в воде водных объектов питьевого и хозяйственно-бытового (хозяйственно-питьевого) и рекреационного (культурно-бытового) водопользования (согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [2]. Ориентировочные допустимые уровни (ОДУ) химических веществ в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, воде плавательных бассейнов, аквапарков);

– нормативы предельно допустимых концентраций химических веществ, установленных в соответствии с показателями предельно допустимого содержания химических веществ в окружающей среде и несоблюдение которых может привести к загрязнению окружающей среды, деградации естественных экологических систем (рекомендуется применять для веществ двойного генезиса).

Установление последнего норматива ПДК химических веществ производится на основе параметров естественного регионального фона. Под региональным фоном понимается значение показателей качества воды, сформировавшееся под влиянием природных факторов, характерных для региона, не являющееся вредным для сложившихся экологических систем.

В соответствии с п. 10 «Методических указаний по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты», утв. приказом МПР России от 12.12.2007 № 328 [1]:

– для ксенобиотиков, а также высокоопасных веществ нормативы качества воды принимаются в зависимости от целевого использования водных объектов равными рыбохозяйственным или гигиеническим нормативам предельно допустимых концентраций (ПДК);

– для веществ двойного генезиса в зависимости от конкретных условий и наличия приоритетных видов использования нормативы качества воды могут приниматься равными нормативам предельно допустимых концентраций химических веществ, которые определяются с учетом регионального естественного (условно-естественного) гидрохимического фона дифференцированно для конкретных типов водных объектов.

Установление нормативов ПДК химических веществ на основе параметров естественного регионального фона для притоков р. Черная не применяется, т.к.

гидрохимические наблюдения на этих водных объектах ФГБУ «Крымское УГМС» не проводятся. Наблюдения на пунктах Территориальной системы наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных водных объектов города Севастополя систематически проводятся только с 2017 г. и, в связи с особенностями водного режима притоков, не содержат результаты для всех сезонов годового цикла каждого объекта. Кроме того, в настоящее время не проводятся гидрохимические наблюдения на участках притоков р. Черная, не подверженных какой-либо антропогенной нагрузке, что не позволяет обосновать значения естественного гидрохимического фона дифференцированно для этих водных объектов.

В соответствии с требованиями РД 52.24.622–2019 «Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод» [4] при отсутствии результатов систематических гидрохимических наблюдений на водном объекте во все сезоны годового цикла для установления НДС и НДВ в качестве норматива качества воды используют только предельно допустимые концентрации (ПДК).

Таким образом, для обоснования нормативов качества воды притоков р. Черная применяем следующий алгоритм:

1. Водные объекты отнесены к природным водным объектам, воздействие антропогенной нагрузки на которые не привели к изменению их основных гидрологических и морфологических характеристик.

2. В составе загрязняющих веществ присутствуют ксенобиотики и вещества двойного генезиса.

3. Осуществляется комплексное использование водных объектов при отсутствии установленных приоритетов их использования.

4. Имеющаяся мониторинговая информация не позволяет обосновать значения естественного гидрохимического фона для установления на их основе нормативов качества воды по следующим причинам:

– гидрохимические наблюдения на притоках р. Черная Росгидрометом не проводятся;

– наблюдения на пунктах Территориальной системы наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных водных объектов города Севастополя систематически выполняются только с 2017 г. и не содержат результаты для всех сезонов годового цикла на участках притоков р. Черная, не подверженных антропогенной нагрузке.

5. С учетом изложенного, в качестве нормативов качества воды водных объектов для расчета НДВ как для ксенобиотиков, так и для веществ двойного генезиса приняты наиболее жесткие нормы качества воды для имеющихся на водном объекте видов водопользования (гигиенические или рыбохозяйственные ПДК).

Среднегодовые концентрации взвешенных веществ в воде притоков р. Черная в 2020 году составили 5,7 – 9,8 мг/л, таким образом, для расчета НДВ по взвешенным веществам можно принять норматив 10 мг/л.

Рыбохозяйственные нормативы ($ПДК_{р\text{-}х}$), согласно [3], приняты по всем остальным учитываемым показателям за исключением $БПК_5$. По $БПК_5$ принят более жесткий гигиенический норматив ($ПДК_г$) согласно [2].

Заключение. Проведенные исследования позволили прийти к следующему:

– загрязнение вод притоков р. Черная происходит от трех основных типов источников – точечные источники организованного сброса хозяйственно-бытовых и приравненных к ним сточных вод; потенциально управляемые диффузные источники загрязнения (неорганизованные сбросы хозяйственно-бытовых сточных вод); неуправляемые диффузные источники загрязнения (сток с территорий сельхозугодий и населенных пунктов);

– перечень веществ (показателей), оказывающих существенное влияние на качество воды притоков р. Черная и подлежащих учету в составе нормативов допустимого воздействия на эти водные объекты включает фосфаты, нитриты, аммоний-ион, БПК5, взвешенные веще-

ства, железо, марганец, медь, магний, кальций, никель, цинк, фенолы, сульфаты, АПАВ, нефтепродукты;

– к приоритетным загрязнителям (показателям), концентрации которых могут превышать нормативы ПДК для большинства притоков р. Черная относятся $БПК_5$, нитриты, фенолы, железо общее, марганец, медь;

– при разработке НДВ для притоков р. Черная как для ксенобиотиков, так и для веществ двойного генезиса целесообразно принимать наиболее жесткие нормативы качества воды для имеющихся на водном объекте видов водопользования (гигиенические или рыбохозяйственные ПДК).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Методические* указания по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты. Утверждены приказом МПР России от 12.12.2007 № 328. [Электронный источник] / https://docs.cntd.ru/document/902083847 (дата обращения: 20.09.2022).

2. *СанПиН* 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. [Электронный источник] / https://docs.cntd.ru/document/573500115 (дата обращения: 20.09. 2022).

3. *Приказ* Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (с изменениями на 10.03.2020). [Электронный источник] / https://docs.cntd.ru/document/420389120 (дата обращения: 20.09. 2022).

4. *РД* 52.24.622–2019 Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод. [Электронный источник] / http://www.pfo.meteorf.ru/assets/files/56/52.24.622-2019.pdf. (дата обращения: 20.09. 2022).

PRIORITY POLLUTANTS AND WATER QUALITY STANDARDS OF THE BLACK RIVER TRIBUTARIES

E.I. Azarenko, L, I. Osadchaya

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

Pollutants and sources of their incoming into the waters of the Black River tributaries are identified; the analysis of the results of observations at the points of the Territorial system of monitoring of the state and pollution of surface water bodies of the city of Sevastopol over the period from 2016 to 2020 is carried out; substances that have a significant impact on the water quality in the the Black River tributaries and are subject to accounting as part of the permissible impact standards for each water body are identified; water quality standards for the Black River tributaries for each substance from the list of priority pollutants are established.

Keywords: pollution of water bodies, priority pollutants, permissible impact standards, organized discharge, diffuse discharge, runoff from territories, water quality standards.

REFERENCES

1. *Prikaz MPR RF 12.12.2007 № 328* (Code of laws of the Russian Federation), 2007 (September 20, 2022).

2. *SanPiN 1.2.3685-21* (Electronic fund of legal and electronic documents), 2021 (September 20, 2022).

3. *Prikaz Ministerstva sel'skogo hozjajstva RF 13.12.2016 № 552* (Code of laws of the Russian Federation), 2016 (September 20, 2022).

4. *RD 52.24.622–2019.* (Standard RF), Rostov-na-Donu: Roshydromet, 2019 (September 20, 2022).

УДК 681.3 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-112-122

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ YOLOV5 ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МИКРООБЪЕКТОВ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

А.Н. Греков[1,2*], Ю.Е. Шишкин[1], С.С. Пелюшенко[1], А.С. Маврин[1,2]

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

В работе представлены результаты исследований применения модели машинного обучения YOLOV5 для решения задачи автоматизированного обнаружения и распознавания микрообъектов в морской среде. Обучение и валидация модели осуществлялась на подготовленной на базе данных реальных изображений, содержащей образцы микропланктона и микропластика. Приведены результаты экспериментов, с использованием обученного алгоритма, по нахождению микрообъектов на фото- и видеоизображениях в режиме реального времени. Экспериментальные исследования показали высокую достоверность результатов, получаемых моделью, сравнимую с распознаванием вручную, при решении задач обнаружения и распознавания микрообъектов в морской среде.

Ключевые слова: машинное обучение, морская среда, YOLOV5, микропластик, микропланктон, распознавание в реальном времени.

Поступила в редакцию: 10.10.2022. После доработки: 28.11.2022.

Введение. В современной науке машинное зрение является одним из перспективных методов исследования морской среды. За последнее десятилетие достигнут большой прогресс в области обнаружения объектов на видеоизображениях в режиме реального времени. Обнаружение объектов рассматривается как метод компьютерного зрения, который используется для нахождения и идентификации объектов [1–4].

Традиционные методы обнаружения объектов обычно состоят из 3 этапов [2]:

1) определение местоположения объектов. Для этого изображение сканируется с помощью скользящего окна, что требует больших вычислительных затрат и может выдавать нерелевантных кандидатов;

2) извлечение признаков с использованием методов HOG (Histogram of Oriented Gradient) [3], SIFT (Scale Invariant Feature Transform) [4] и др. Однако из-за различных условий освещения, изменений в ракурсах и фонах очень сложно вручную разработать надежный дескриптор объектов для точного описания всех их типов;

3) использование специализированных классификаторов (например, классификатор SVM) для распознавания объектов.

Применение новых подходов глубокого обучения (ГО) значительно улучшили качество решения задачи машинного зрения за счет реализации аппаратных вычислений на графических процессорах при классификации изображений и обнаружения объектов [5]. После значительно возросшей производительности вычислительного оборудования глубокие нейронные сети (DNN – Deep neural networks) стали широко применяться в области обнаружения объектов, например планктона, из-за их возможностей более эффективного извлечения признаков по сравнению с традиционными методами [6]. Алгоритмы обнаружения объектов на основе ГО делятся на две категории: двухэтапные и одноэтапные методы. В 2014 г. Росс Гришик и др. [7] предложили двухэтапный алгоритм обнаружения R-CNN (Regionswith CNN Features), и первыми применили сверточную нейронную сеть (CNN – convolutional neural network) к задаче обнаружения объектов. Исследование по-

казало почти 30% улучшение коэффициента обнаружения объектов по сравнению с более ранними методами. Данный подход выборочного поиска для извлечения областей изображения состоит из двух этапов: первый этап предназначен для извлечения возможных характеристик объекта с использованием метода на основе региона, а второй этап – для извлечения функций из каждого региона с использованием CNN.

Двухэтапные алгоритмы обнаружения, такие как Fast RCNN [8] и Faster RCNN [9] появились несколько позже и являются развитием HOG и SIFT. Сначала была опубликована обновленная версия Fast RCNN [10], которая использует выборочный поиск для генерации различных объектов, а после и Faster RCNN. Вместо того, чтобы извлекать их все независимо, с помощью классификаторов SVM, новый подход применяет CNN к полному изображению. Затем используются обе области интереса (RoI), объединяя карту объектов с окончательной сетью прямой связи для классификации и регрессии. По сравнению с предыдущими работами, посвященными ГО, Fast R-CNN имеет более высокую скорость обучения и точность обнаружения. Однако двухэтапные методы обладают большей вычислительной сложностью и низкой скоростью вывода из-за большого количества блоков предсказания, вследствие чего для встроенных платформ их применение весьма ограниченно.

Большое количество исследований направлено на применение универсальных нейронных сетей для решения узкоспециализированных задач, например, для распознавания планктона. В работах AlexNet и VGGNet, Dai J и другие [6] предложена проблемно-ориентированная нейронная сеть распознавания микропланктона ZooplanktoNet, состоящая из 11 слоев и достигшая точности (метрики правильности) 93,7%. Ли Х и др. и Ру О и др. использовали глубокую остаточную сеть и глубокую CNN с многоразмерным модулем распознавания изображений для классификации планктона. Ли и др. включили трансферное обучение путем предварительного обучения CNN с данными, нормализованными по классу, и точной настройки с исходными данными в открытом наборе данных под названием WHOI-Plankton. Показано, что точность (метрика правильности) классификации повышается, но остается серьезная проблема с качеством прогнозирования для редких аномальных классов. Люмини А. и др. работали над тонкой настройкой и переносом обучения нескольких известных моделей глубокого обучения (AlexNet, GoogleNet, VGG и др.) для разработки ансамбля классификаторов планктона. Производительность такого подхода превзошла более ранние модели, а уровень точности распознавания (метрики правильности) достиг 95,3% в эксперименте с набором изображений базы данных WHOI-Plankton.

Шаокинг Рен и др. [11], вместо использования выборочного поиска, как в R-CNN и Fast R-CNN, применяли технологию region proposal networks (RPN) для извлечения регионов изображения. В RPN полностью используется сверточные функции изображения, которые предсказывают границы объектов и безобъектные оценки каждой позиции. Также были объединены быстрые R-CNN и RPN, для сформирования единой унифицированной сети на основе глубокого обучения с использованием общей функции свертки.

Вэй Лю и др. [12] представили метод обнаружения объектов на основе одной DNN, названный Single ShotMultiBox Detector (SSD). Новый подход основан на многомасштабной сверточной сети с прямой связью, которая делит выходное пространство целевых блоков с другим соотношением сторон для входного изображения. Метод SSD прост в обучении и применим для интеграции с системами, которым требуется обнаружение. Результаты экспериментов показывают более высокую производительность и точность, если разрешение исходных изображений невысокое.

Перспективным методом обнаружения микрообъектов в морской среде является использование одноэтапных моделей, таких как YOLO**.** Редмон и др. [13] представили новый унифицированный

подход к обнаружению объектов под названием You Only Look Once (YOLO). В YOLO используется одна нейронная сеть для всего изображения при определении вероятности принадлежности объектов к классам и построении ограничивающих рамок, применяя однократную оценку. Этот метод позволяет реализовывать очень быстрые детекторы объектов, работающие в реальном времени, и обрабатывать изображение со скоростью 155 кадров в секунду. Редмон и др. показали, что по сравнению с альтернативными моделями, YOLO имеет меньшую вероятность ложных предсказаний на изображении. В ходе дальнейшего развития появились такие модели, как YOLOV2 [14], YOLOV3 [15], SSD [16] и другие одноэтапные сети обнаружения, обладающие более высокой скоростью обнаружения достаточной для удовлетворения требований работы в реальном времени.

YOLO считается одной из лучших моделей обнаружения объектов. Многие исследователи проводили ее сравнение с другими моделями для оценки, и с успехом используют ее в своих работах. В работе Тамошкина М.С. и др. [17] приведено сравнение YOLOV5, Faster R-CNN и др. где было подтверждено, что YOLOV5 работает значительно быстрее чем другие при этом на 2–7% проигрывая в точности (метрика правильности).

Филичкин С.А. и Вологдин С.В. [18] применяли YOLOV5 для распознания на изображении наличия у людей средств индивидуальной защиты, и признали высокую эффективность данной модели для такого рода задач.

Лянг Т.Ж. и др. [19] предложили усовершенствованный метод обнаружения на изображении сварного шва колеса транспортного средства, основанный на модели обнаружения объектов YOLOV4 и подтвердили его эффективность в данной области исследований.

Каплуненко Д.Д. и др. [20] исследовали возможность использования модели YOLOV5 для классификации подводных живых объектов, которые динамически и самостоятельно перемещаются в поле зрения подводных камер стационарной установки. В ходе работы было продемонстрированно, что модель позволяет решать задачи такого типа, однако выявлена острая зависимость качества решения от полноты, применяемого для обучения нейросети, набора данных.

Также, алгоритм YOLOV5 используется для обнаружения объектов в задачах наблюдения за морским фитопланктоном. Например, А. Педраса и др. применили модели обнаружения объектов RCNN и YOLO к 10 классам микроскопических изображений диатомовых водорослей. Ю. Ли и др. разработали сеть DenseYOLOV3 для улучшения метрики mAP (англ. Mean Average Precision) выбранных из восьми категорий фитопланктона в наборе данных WHOI-Plankton. Чтобы решить проблему несбалансированного набора данных по фитопланктону, Ю. Ли и др. применили методику синтеза данных с помощью CycleGAN для повышения эффективности обнаружения. В. Ли и др. создали набор данных PMID2019, содержащий 10000 микроскопических изображений фитопланктона 24 различных категорий, и сравнили производительность алгоритмов обнаружения объектов, включая Faster-RCNN, SSD, YOLOV3 и RetinaNet, при этом YOLOV3 оказался лидером по критерию скорости. Ши З. использовал модифицированную модель YOLOV2 для обнаружения зоопланктона на голографических изображениях.

В предложенной авторами работе рассматривается способ решения задачи обнаружения и классификации микроорганизмов и микропластика в морской среде с помощью модели YOLOV5. Для этого был осуществлен сбор образцов микропланктона и микропластика морской среды, на их основе подготовлены фото- и видеоматериалы для обучения нейронной сети YOLOV5, проведено обучение нейросети и испытания в режиме реального времени.

Материалы и методы. В представленной работе использовалась модель YOLOVX, реализованная на Python в виде свободно распространяемой биб-

лиотеки YOLOV5. Для разметки изображений применялся свободно распространяемый инструмент Label-Studio.

Модель YOLO представляет собой набор алгоритмов, где решаются задачи обнаружения объектов. YOLO – одноэтапный алгоритм глубокого обучения, который использует сверточные нейронные сети для обнаружения объектов. YOLOV5 представляет собой семейство моделей обнаружения объектов, включающее лучшие методы и практики машинного зрения на базе YOLO, собранные автором – Гленном Джохером, на базе предыдущих версий YOLOV1-YOLOV4, за авторством Джозефа Редмона, Али Фархади, Алексея Бочокновского, Цзяня-Яо Вана и Хун-Юань Марка Ляо.

Среди преимуществ применения YOLOV5 для встраиваемых систем мониторинга водной среды стоит выделить следующие:

– необходим малый объем памяти для развертывания модели;

– модели семейства YOLO, в частности YOLOV5, исключительно быстры и намного превосходят R-CNN и другие модели;

– модель лучше других различает цель и фоновую область.

Общий ход исследования состоял из следующих этапов:

1) подготовка оборудования, требуемого для работы: компьютер, камера, морская вода с микропластиком и микроорганизмами;

2) видеозахват с помощью камеры некоторого количества образцов изображений воды с микропластиком и микроорганизмами. В рамках данной работы для обучающего массива использовано – 168 изображений, для контрольной выборки – 35 изображений.

3) разметка на изображениях обучающей выборки с помощью label-studio для обучающего массива нейронной сети представлена на рис. 1;

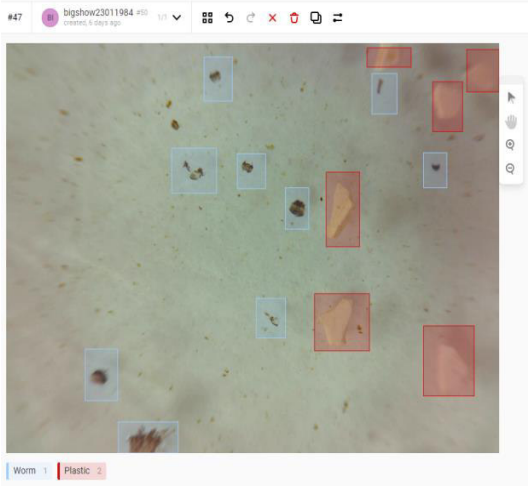


Рис. 1. Выполнение разметки в label studio
Fig. 1. Markup execution in label studio

4) экспорт обучающего массива из label-studio в формате, требуемом для работы YOLOV5;

5) импорт обучающего массива в YOLOV5;

6) обучение нейронной сети;

7) использование нейронной сети для обнаружения и классификации объектов на изображениях контрольной выборки;

8) валидация модели по данным контрольной выборки;

9) сравнение и анализ результатов.

Обучающий массив для использования в модели YOLOV5 должен иметь определенную структуру, представленную в виде набора файлов, разбитых на 4 группы:

1. изображения, используемые для формирования обучающей выборки;

2. данные о разметке соответствующих изображений (классы и координаты объектов, размерности изображений);

3. информация о всех рассматриваемых классах объектов.

4. описание классов объектов и самого массива изображений обучающей выборки.

Для получения изображений использована цифровая камера ELP 5-50, с разрешением 3264x2448 пк, телеобъективом 5–50 мм. Изображения получены в лабораторных условиях при освещении 500 лк. Распознаваемые объекты разделены на два

класса: микропластик и микропланктон, имеющие геометрические размеры 1–7 мм.

Результаты. Для выполнения работы был подготовлен массив обучающей выборки, содержащий 168 изображений, и применен для обучения нейронной сети. Сеть сконфигурирована следующим образом: 50% всех изображений использовались для обучения нейросети, 25% для теста, 25% для валидации. Для изучения эффективности работы модели при разном сроке обучения сеть обучалась на одном обучающем массиве с различным числом итераций. Для сравнения на рис. 2 а и рис. 2 б представлены результаты обнаружения и классификации объектов на исследуемом изображении для нейросети, обученной на 50 и 500 итерациях соответственно. В визуализации, вокруг обнаруженных объектов, отображается ограничивающая рамка, позволяющая определить их положение и движение на изображении.



(а)



(б)

Рис. 2. Результат для 50 (а), 500 итераций (б)
Fig. 2. Result for 50 (a), 500 iterations (b)

Как показали результаты экспериментов, при 500 итерациях были определены и верно классифицированы все объекты на изображении. При 50 итерациях также были определены весь микропластик и микроорганизмы, однако присутствовало большое число ложных срабатываний и дубликатов.

Для подтверждения эффективности работы сети при разном сроке обучения сравнивались численные оценки работы нейронной сети, т.е. метрики функции потерь (потеря регрессии, потеря достоверности, потеря классификации).

Суть функции потерь – получение численной оценки, определяющей, насколько хорошо работает модель. Если прогноз значительно отличается от фактического значения, численная мера функции потерь будет очень высокой. Однако, если оба значения почти одинаковы, значение потерь будет очень низким. Функция потерь в YOLO состоит из трех частей:

1. box_loss – потери ограничивающей рамки. Если ячейка сетки содержит объекты, то будет вычислена потеря ограничивающей рамки, т.е. насколько полно объект вписан в ограничивающую рамку. С возможными значениями 0 при 100% определении объекта, и возрастает по мере падения процента.

2. obj_loss – потеря достоверности. Определяет, насколько точно объекты отделены от фона изображения.

3. clc_loss – потеря классификации. Определяет, насколько верно объекты распределены по классам.

Эти функции оценки потерь применяются для настройки модели в процессе обучения и для её валидации. Графики динамики сходимости функций оценки потерь для 50 и 500 итераций представлены на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

На рис. 5 представлен пример успешно распознанного изображения, подвергшегося оптическим искажениям, свойственным подводным условиям *in situ*: размытие, хроматические аберрации, рассеивание и преломление света при прохождении его через неоднородную среду воздух-вода-стекло. Из представленных результатов распознавания видно, что при наличии искажений снижается точность распознавания объектов по мере удаления от центра изображения.

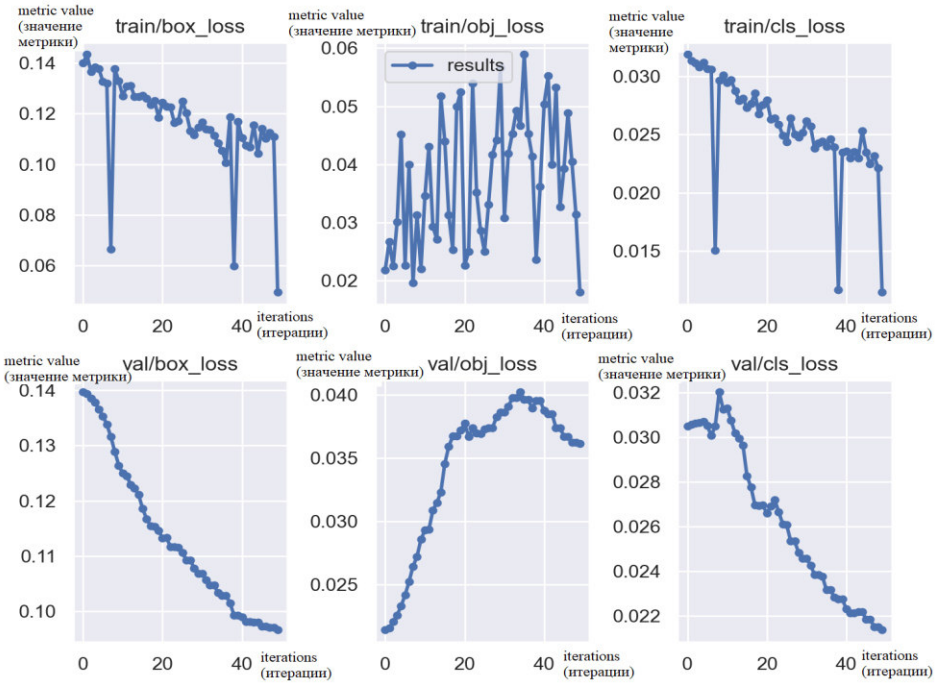


Рис. 3. Графики потерь при обучении и распознавании объектов нейронной сетью для 50 итераций
Fig. 3. Graphs of losses during training and recognition with a neural network for 50 iterations

Как показано на рис. 4 при увеличении числа итераций происходит нелинейное улучшение показателей метрик качества (меньше – лучше), которые, для собранной базы данных изображений планктона и микропластика, достигают приемлемых для практического использования значений при 400 и более итерациях.

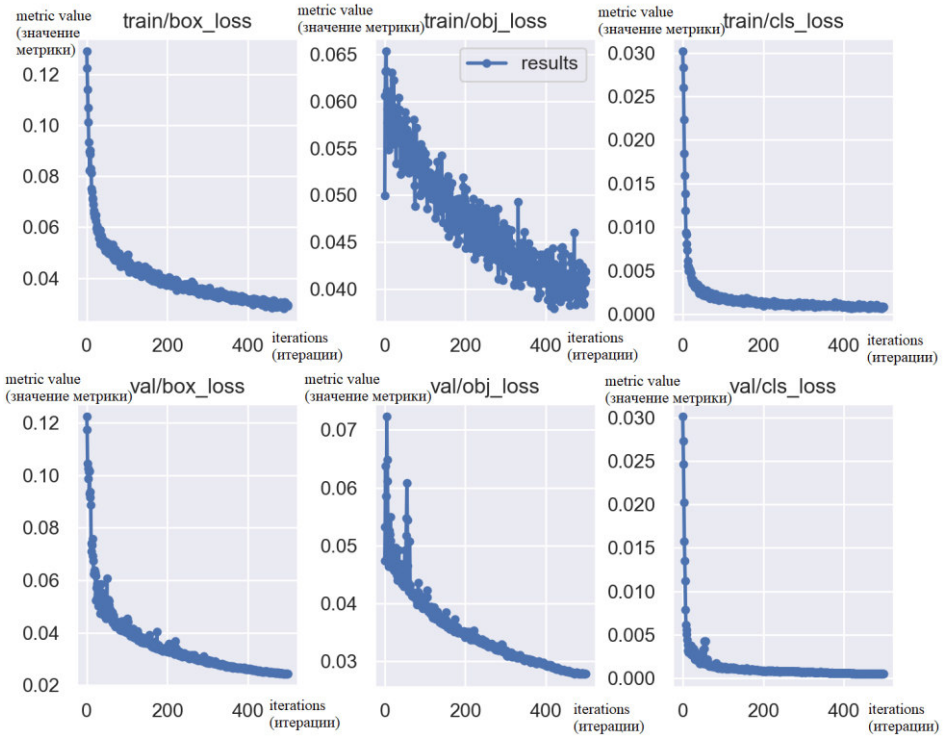


Рис. 4. Графики потерь при обучении и распознавании объектов нейронной сетью для 500 итераций
Fig. 4. Graphs of losses during training and recognition with a neural network for 500 iterations

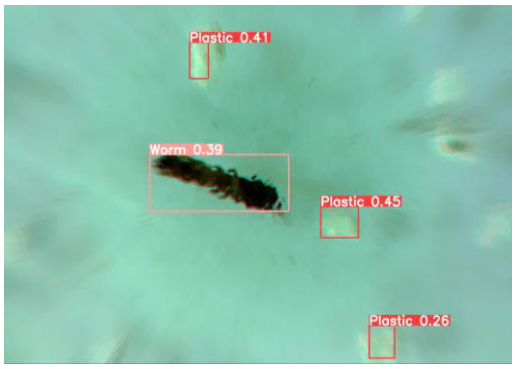


Рис. 5. Результаты распознавания при наличии оптических искажений для 500 итераций
Fig. 5. Recognition results in the presence of optical distortions for 500 iterations

Далее осуществлялась оценка успешности распознания нейронной сетью контрольной выборки метриками:

1. precision (точность) – измеряет, насколько точны предсказания, т.е. какая часть предсказаний верна, описывается формулой (1).

$$precision = \frac{TP}{TP+FP}, \qquad (1)$$

где TP (TruePositive) – правильное определение класса, FP (FalsePositive) – принятие неправильного объекта за класс.

2. recall (полнота) – измеряет, насколько хорошо обнаруживаются искомые объекты, описывается формулой (2).

$$recall = \frac{TP}{TP+FN}, \qquad (2)$$

где FN (FalseNegative) – невыделение объекта класса.

3. mAP – усредненное значение AP для IoU = 0.5 (Intersection over union, измеряет перекрытие между 2 границами, используется чтобы измерить, насколько прогнозируемая граница совпадает с реальной границей объекта). Является одной из основных метрик эффективности нейронной сети. Average Precision вычисляет среднюю точность для recall в диапазоне от 0 до 1. IoU используется для определения процента перекрытия между предсказанной областью нахождения объекта и его реальной областью нахождения. Для некоторых наборов данных для IoU предопределяется некий порог, и это используется для классификации объекта (например, истинно-положительные).

4. mAP (0.5, 0.95) – усредненное значение AP для IoU от 0.5 до 0.95, с размером шага 0.05.

Данные метрики для 50 и 500 итераций представлены на рис. 6 и рис. 7 соответственно.

Интегральные показатели качества распознавания (график зависимости precision от recall) для 50 и 500 итераций представлены на рис. 8 а и рис. 8 б соответственно.

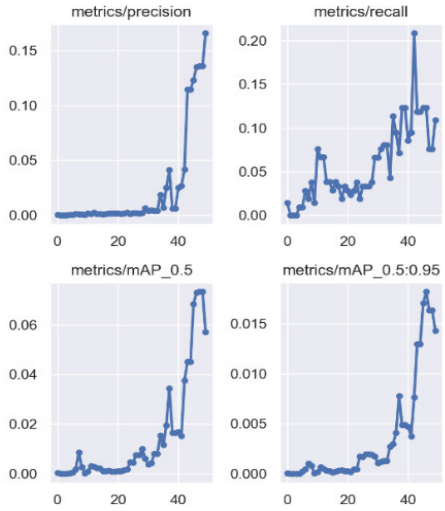


Рис. 6. Графики метрик качества распознавания нейронной сетью при 50 итерациях
Fig. 6. Graphs of metrics for a neural network for 50 iterations

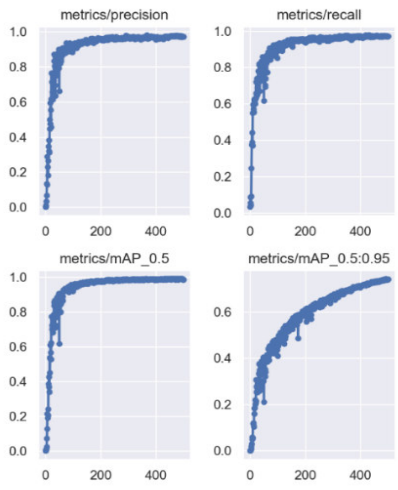
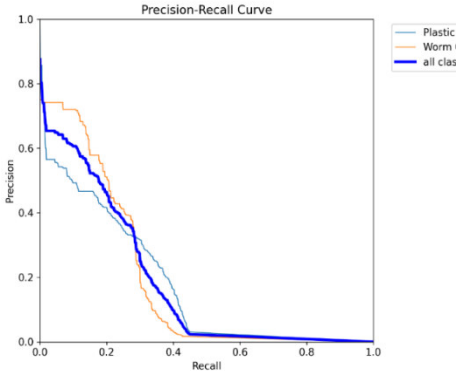
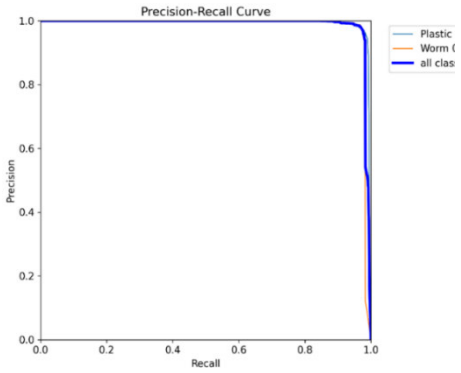


Рис. 7. Графики метрик качества распознавания нейронной сетью при 500 итерациях
Fig. 7. Graphs of metrics for a neural network for 500 iterations



(а)



(б)

Рис. 8. Кривая precision-recall для нейронной сети на 50 (а) и 500 итераций (б)
Fig. 8. Precision-recall curve for a neural network for 50 epochs (a) and 500 epochs (б)

Обсуждение и заключение. При рассмотрении численных метрик качества работы полученной модели можно отметить следующее:

1. Значение precision при увеличении числа итераций при обучении постепенно растет, стремясь к 1. Программа с продвижением по итерациям улучшается, и начинает определять объекты почти со 100% точностью. Такого уровня на рассмотренном примере программа достигает к 200 итерации. Это означает, что модель верно классифицирует объекты на изображении.

2. Значение recall с ростом числа итераций растет, стремясь к 1. В программе по мере увеличения числа итераций постепенно повышается полнота, обнаруживаются почти 100% требуемых объектов. Это уровень в программе достигается к 500 итерации.

3. Значение mAP также возрастает по мере увеличения числа итераций до 300, достигая почти 100% точности детектора объектов. Это означает, что данная модель обнаруживает объекты на изображении полностью.

4. Потери показывают, насколько хорошо работает модель в контексте наличия ошибок второго рода при обнаружении и классификации. Величина потерь в реализованной модели стремится к 0, что подтверждает эффективность ее работы. Значение box_loss составляет 0.01 к 500 итерации. Это означает, что объекты полностью определяются ограничивающей рамкой, т.е. программа находит объекты целиком. Параметр obj_loss – потери достигает значения 0.03 к 500 итерации. Это показывает, что программа обнаруживает все объекты, отделяя их от фона. Величина clc_loss – потери классификации составило 0 к 200 итерации, что свидетельствует о верном распределении объектов по классам.

Исходя из результата, можно сделать вывод, что модель показывает хорошие результаты в решении задач обнаружения микрообъектов в морской среде.

В результате исследований на собранном наборе данных обучающей выборки фото- и видеоизображений микропланктона и микропластика обучена модель YOLOV5, решающая задачу автоматического обнаружения и распознавания микрообъектов в морской среде. Выбраны численные метрики качества и проведены экспериментальные исследования для реализованной модели в реальном времени, которые показали высокую достоверность получаемых результатов, сравнимую с распознаванием вручную, при решении задач обнаружения микрообъектов в морской среде.

Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС "Разработка новых средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод" (№ госрегистрации 121122300070-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Viola P., Jones M*. Managing work role performance: challenges for twenty-first century organizations and their employees // Rapid Object Detect using a Boost Cascade Simple Featur, 2001. P. 511–518.

2. *Sachin M.* Different Types of Object Detection Algorithms in Nutshell // Machine Learning Knowledge, 2020.

3. *Dalal N., Triggs B*. Histograms of oriented gradients for humandetection // 2005 IEEE computer society conference on computervision and pattern recognition (CVPR'05). 2005. Vol. 1. P. 886–893.

4. *Lowe D.G.* Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International journal of computer vision. 2004. Vol. 60, № 2. P. 91–110.

5. *LeCun Y., Bengio Y., Hinton G.* Deep learning // Nature. 2015. Vol. 521, № 7553. P. 436–444.

6. *Dai J., Wang R., Zheng H., Ji G., Qiao X.* Zooplanktonet: Deep convolutional network for zooplankton classification. // Proceedings of the OCEANS 2016-Shanghai, Shanghai, China, 10–13 April 2016; IEEE: New York, NY, USA, 2016. P. 1–6.

7. *Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J.* Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2014. P. 580–587.

8. *Girshick R.* Fast R-CNN in AI // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015. P. 144–148.

9. *Ren S., He K., Girshick R., Sun J.* Faster R-CNN: Towards realtime object detection with region proposal networks // Advances in neural information processing systems. 2015. Vol. 28. P. 91–99.

10. *Girshick R.* Fast R-CNN // Proceeding IEEE International Conference Computer Visual. 2015. P. 1440–1448.

11. *Ren S., He K., Girshick R., Sun J.* Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2017. Vol. 39(6). P. 1137–1149.

12. *Konishi Y., Hanzawa Y., Kawade M., Hashimoto M.* Fast 6D pose estimation using hierarchical pose trees // Eccv. 2016. 1. P. 398–413.

13. *Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A.* You only look once: unified, real-time object detection // Proceeding IEEE Computer Social Conference Computer Visual Pattern Recognition 2016-December, 2016, pp. 779–788.

14. *Redmon J., Farhadi A.* YOLO 9000: better, faster, stronger // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2017. P. 7263–7271.

15. *Farhadi A., Redmon J.* YOLOV3: An incremental improvement // Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: Springer Berlin/Heidelberg, Germany. P. 1804–2767.

16. *Liu W.* Ssd: Single shot multibox detector // European conference on computer vision. 2016: Springer. P. 21–37.

17. *Тимошкин М.С., Миронов А.Н., Леонтьев А.С.* Сравнение YOLOV5 и faster R-CNN для обнаружения людей на изображении в потоковом режиме // Международный научно-исследовательский журнал № 6 (120). Ч. 1. С. 137–146.

18. *Филичкин С.А., Вологди С.В.* Применение нейронной сети YOLOV5 для распознавания наличия средств индивидуальной защиты // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, № 2. С. 61–67.

19. *Liang T.J., Pan W.G., Bao H., Pan F,* Vehicle wheel weld detection based on improved YOLOV4 algorithm // Computer optics. 2022. Vol. 46, № 2. P. 271–279

20. *Каплуненко Д.Д., Зотов С.С., Суботэ А.Е., Фищенко В.К.* Применение нейронных сетей для классификации биологических объектов по подводным камерам МЭС острова Попова // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 1 (39). С. 72–79.

APPLICATION OF THE YOLOV5 MODEL FOR THE DETECTION OF MICRO-OBJECTS IN THE MARINE ENVIRONMENT

A.N. Grekov[1,2], Y.E. Shishkin[1], S.S. Peliushenko[1], A.S. Mavrin[1,2]

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

The efficiency of using the YOLOV5 machine learning model for solving the problem of automatic detection and recognition of micro-objects in the marine environment is studied. Samples of microplankton and microplastics were prepared, according to which a database of classified images was collected for training an image recognition neural network. The results of experiments using a trained network to find micro-objects in photo and video images in real time are presented. Experimental studies have shown high efficiency, comparable to manual recognition, of the proposed model in solving problems of detecting micro-objects in the marine environment.

Keywords: machine learning, marine environment, YOLOV5, microplastics, microplankton, real-time recognition.

REFERENCES

1. *Viola P. and Jones M*. Managing work role performance: challenges for twenty-first century organizations and their employees. Rapid Object Detect using a Boost Cascade Simple Feature, 2001, pp. 511–518

2. *Sachin M.* Different Types of Object Detection Algorithms in Nut-shell. Machine Learning Knowledge, 2020.

3. *Dalal N. and Triggs B*. Histograms of oriented gradients for human detection. 2005 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'05), 2005, Vol. 1, pp. 886–893.

4. *Lowe D.G.* Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International journal of computer vision, Vol. 60, No. 2, 2004, pp. 91–110.

5. *LeCun Y., Bengio Y., and Hinton G.* Deep learning. Nature, Vol. 521, No. 7553, 2015, pp. 436–444.

6. *Dai J.; Wang R.; Zheng H.; Ji G. and Qiao X.* Zooplanktonet: Deep convolutional network for zooplankton classification. Proceedings of the OCEANS 2016-Shanghai, Shanghai, China, 10–13 April 2016; IEEE: New York, NY, USA, 2016, pp. 1–6.

7. *Girshick R., Donahue J., Darrell T. and Malik J.* Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2014, pp. 580–587.

8. *Girshick R.* Fast R-CNN. Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, 2015, pp. 1440–1448.

9. *Ren S., He K., Girshick R., and Sun J.* Faster R-CNN: Towards realtime object detection with region proposal networks. Advances in neural information processing systems, Vol. 28, 2015, pp. 91–99.

10. *Girshick R.* Fast R-CNN. Proceeding IEEE International Conference Computer Visual, 2015 Inter: 1440–1448 (2015).

11. *Ren S., He K., Girshick R., and Sun J.* Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 39(6), 2017, pp. 1137–1149.

12. *Konishi Y., Hanzawa Y., Kawade M., and Hashimoto M.* Fast 6D pose estimation using hierarchical pose trees. Eccv. 1, 2016, pp. 398–413.

13. *Redmon J., Divvala S., Girshick R., and Farhadi A.* You only look once: unified, real-time object detection. Proceeding IEEE Computer Social Conference Computer Visual Pattern Recognition 2016-December, 2016, pp. 779–788.

14. *Redmon J. and Farhadi A.* YOLO 9000: better, faster, stronger. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2017, pp. 7263–7271.

15. *Farhadi A. and Redmon J.* YOLOV3: An incremental improvement. Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: Springer Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 1804–2767.

16. *Liu W.* Ssd: Single shot multibox detector. European conference on computer vision, 2016: Springer, pp. 21–37.

17. *Timoshkin M.S., Mironov A.N., and Leontiev A.S.* Sravnenie YOLOV5 i faster R-CNN dlya obnaruzheniya lyudej na izobrazhenii v potokovom rezhime (Comparison of YOLOV5 and faster R-CNN for streaming people detection). International research journal № 6 (120), Vol. 1, June, pp. 137–146.

18. *Filichkin S.A. and Vologdin S.V.* Primenenie nejronnoj seti YOLOV5 dlya raspoznavaniya nalichiya sredstv individual'noj zashchity (Application of the YOLOV5 neural network to recognize the presence of personal protective equipment). Intelligent systems in production, 2022, Vol. 20, No. 2, pp. 61–67.

19. *Liang T.J., Pan W.G., Bao H., and Pan F.* Vehicle wheel weld detection based on improved YOLOV4 algorithm. COMPUTER OPTICS, 2022, Vol. 46, No. 2, pp. 271–279.

20. *Kaplunenko D.D., Zotov S.S., Subote A.E., and Fishchenko V.K.* Primenenie nejronnyh setej dlya klassifikacii biologicheskih ob"ektov po podvodnym kameram MES ostrova Popova (Application of neural networks for classification of biological objects according to underwater chambers of MES of Popov island). Underwater research and robotics, 2022, No. 1 (39), pp. 72–79.

УДК 551.4.013 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-123-132

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ И ИХ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ НА УЧАСТКАХ РЕЗКО НЕРАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА В УСТЬЯХ РЕК

Д.А. Антоненков[1], А.Е. Щодро[2]

[1]ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН»,
РФ, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: dmitry_science@mail.ru
[2]Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: alexeug-petrov@yandex.ru

Описана гидродинамическая модель для контроля структуры развитого турбулентного течения в пространственной зоне отрыва потока за косо-расположенным препятствием на участках резко неравномерного движения потока. Применение такой модели позволяет определять касательные напряжения на поверхности дна и в любой точке рассматриваемой области потока. Значение этих напряжений, в свою очередь позволят оценить развивающую способность потока, возможность образования наносных отложений и интенсивность турбулентности, определяющую массообменные характеристики. Рассмотрена методика визуализации вторичных течений на основе PIV метода, позволяющая построить векторные поля скорости течения на разных горизонтах и визуализировать структуру потока воды.

Ключевые слова: течение, наносы, устья рек, гидротехнические сооружения, проектирование, моделирование.

Поступила в редакцию: 12.10.2022. После доработки: 07.11.2022.

Введение. В природных и искусственных акваториях, реках, каналах и различных водотоках существуют основные течения, и на них, как правило, накладываются вторичные потоки, которые в большинстве являются достаточно слабыми, иногда едва уловимыми. Эти течения значительно усиливаются и усложняются при воздействии гидротехнических сооружений на поток в рассматриваемых акваториях. Обратные их воздействия на русло приводят к активизации лито-динамических процессов и серьезным изменениям конфигурации дна, разрушению берегов и проч.

Основы научной классификации вторичных течений были заложены еще А.С. Образовским [1]. Согласно его концепции наиболее распространенными вторичными течение в реках, морских заливах и водохранилищах являются циркуляционные течения инерционной природы, которые связаны, как правило, с криволинейностью линий тока основного течения. Течения такого вида являются слабыми, при этом модули векторов скоростей циркуляционных течений не превышают 0,1–0,2 от величины скорости поступательного движения основного потока. Вторичные течение имеют как положительные, так и отрицательные свойства. Положительными сторонами вторичных течений являются усиление массообмена, дополнительной захват кислорода через свободную поверхность акватории, промыв удалённых ее районов, освежение потока и, в целом, рекреационный эффект. К отрицательным, например, относится то, что они способствуют повышению мутности акватории, существенно уменьшают фотический слой. Это приводит далее к снижению фотосинтеза, увеличению цветения, интенсификации зарастания; возни-

кают заморы. При этом страдают как бентос, так и макрофиты.

Первые попытки гидротехнического использования таких течений для транспорта наносов было предпринято Потаповым М.В. [2]. А первые попытки теоретического их описания – Миловичем А.Я. [3]. В работах [4–7] отражены особенности влияния этих течений на взвешивание и перенос наносов.

Однако более значительным скоростями обладают течения, возникающие в зонах отрыва при сходе струй основного потока с кромок искусственных сооружений. В таких зонах возникают концентрированные винтообразные течения, то есть сосредоточенные в небольшом объеме потока, не распространяющиеся на весь объём акватории, но по своим размерам соизмеримые с объемом зоны самого отрывного течения. Течения такого вида носят винтообразный характер, то есть траектории частиц, движущихся в этом потоке, напоминают винтовые линии, - частицы вращаются вокруг некоторой оси и одновременно перемещается вдоль неё с поступательными скоростями. Заметим, что они способствуют при этом решению самой важной задачей гидроэкологии водоемов, морских заливов, прибрежных территорий - активизация массообмена в них. Положительными свойствами винтообразных течений являются следующие:

– скорости вращения значительны, они в два – три раза превосходят скорость набегающего потока;

– скорость поступательного движения в винтообразном течении в полтора-два раза превосходит скорость набегающего потока;

– поток за буной (пластиной) имеет повышенную наносо-транспортирующую способность, он транспортирует донные, относительно тяжёлые, наносы, а также лёгкие – взвешенные, причём взвешенные частицы как бы поглощаются из значительного объёма транзитного потока, концентрируются вдоль оси винтообразного течения и переносятся значительными скоростями поступательного движения, имеющими место на оси винтообразного течения;

– течения являются восстанавливающими и очищающими в экологическом смысле они очищают поток, разрывая молекулы сложных соединений, которые являются, как правило, загрязняющими;

– при возникновении отрывного течения в области пониженного давления в нём возникает множество квитанционных пузырьков микроскопического размера, которые очень эффективно очищают поток, способствуя очищению и значительной по объему акватории.

В соответствии с этим актуальным и важным является изучение механизмов возникновения и развития данных процессов. Целью данной работы является определение теоретических и практических подходов к изучению вторичных течений с использованием гидродинамического моделирования и методов научной визуализации.

Материалы и методы. При моделировании таких динамичных процессов необходимо понимать особенности, которыми они обладают и которые нужно учитывать. Так гидродинамическими особенностями течений, возникающих за бунами, резкими преградами нормально расположенными относительно потока, являются:

– возникновение зоны вихревого течения, где режим движения потока близок к плоскому;

– повышенная турбулентность и интенсивный массообмен в области границы раздела потоков;

– наличие струйного пограничного слоя на границе отрывной области;

– повышение давления в области отрыва по направлению основного потока и, как следствие,

– наличие обратного течения в донной области в зоне отрыва;

– активное взвешивание грунта и его распространение по области отрыва.

При косом расположении донного порога за ним наблюдается пространственное отрывное течение вплоть до значения углов α = 30 град. между направлением потока и осью буны. Отрывная зона всегда образуется, и при достаточно больших числах Рейнольдса отличительными особенностями этой зоны в данном случае, помимо указанных выше, являются:

– развитое турбулентное течение развивается вдоль оси всего вальца и продолжается за пределами донного порога, в основном потоке;

– это вихревое течение представляет собой концентрированное, винтообразное (по гидродинамической классификации) течение;

– наличие поступательного движения вдоль оси вальца;

– наличие вращения потока, тем более слабого, чем меньше угол α;

– наличие границы отрыва - линии присоединения, - выделяющей зону отрыва переменной ширины;

– минимальные значения ширины, характерные для начальной зоны отрывного течения, они составляют 2-3 высоты порога;

– максимальные ширины вальца (5-6 высот порога) характерны для средней части порога, несколько ближе к его концу, и минимальные также - к его концу;

– придонные струи в зоне отрыва движутся, приближаясь к порогу – буне;

– турбулентные массы значительных объемов в последней трети длины зоны отрыва активно выходят из этой области, достигают поверхности и выносят с собой значительное количество осадков взвешенного вещества к поверхности;

– усиленный транспорт донных и взвешенных наносов вдоль вальца и их вынос в транзитный поток.

Для расчетного обоснования параметров и эффективности гидротехнических сооружений использована математическая модель структуры развитого турбулентного течения в пространственной зоне отрыва потока за косорасположенным препятствием относительно набегающего водного спокойного потока

При этом использовалась система динамических уравнений О. Рейнольдса (1) и неразрывности (2), замыкаемая уравнениями стандартной k - ε модели турбулентности, переноса энергии турбулентности k – (3) и скорости ее диссипации ε – (4):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=X-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}-\frac{\partial \overline{u_i'u_j'}}{\partial x_j}\ , \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0\ , \quad (2)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+u\frac{\partial k}{\partial x}+v\frac{\partial k}{\partial y}+w\frac{\partial k}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\gamma_т}{\sigma_k}\cdot\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\gamma_т}{\sigma_k}\cdot\frac{\partial k}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\gamma_т}{\sigma_k}\cdot\frac{\partial k}{\partial z}\right)+P_h-\varepsilon+P_{k\gamma}\ ; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+u\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}+v\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}+w\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\gamma_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\cdot\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\gamma_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\cdot\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\gamma_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon}\cdot\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right)+$$
$$+c_1\frac{\varepsilon}{k}P_h-c_2\frac{\varepsilon^2}{k}+P_{\varepsilon\gamma}\ . \quad (4)$$

При этом значения турбулентных напряжений, входящих в правую часть уравнений (1), расписываются согласно градиентной гипотезе (5)

$$\overline{u_i'u_j'}=\gamma_т\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}k\cdot\delta_{ij}\ , \quad (5)$$

где коэффициент γ_T – кинематическая вязкость потока определяемая состоянием турбулентности и может сильно зависеть как от координаты точки потока, так и от состояния самого потока, а также и от его истории.

В уравнениях (1–5) введены следующие обозначения: δ_{ij} – символ Кронекера;

$k = \frac{1}{2}\left(u'^2 + v'^2 + w'^2\right)$ – кинетическая энергия турбулентности, ε – скорость диссипации турбулентной энергии.

Начальные и граничные условия для проведения численных расчетов задавались в соответствии с гипотезой о прилипании жидких частиц к твердой поверхности.

Важной задачей при построении модели турбулентности является задание функции γ_T. В данном исследовании принята зависимость для коэффициент турбулентной вязкости, выражаемого через значения k и ε следующим образом: $\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$,

где C_μ=0,03…0,05 – коэффициент, определенный из сравнения результатов численных и физических экспериментов, выполненных автором, зависящий от соотношения генерационного и диссипативного членов в уравнениях модели [6, 7].

Система уравнений (1–5) решалась комбинацией методов:

• расчета скоростей по неявной схеме на грубой равномерной сетке, на основе неявной схемы с использованием простейших моделей турбулентности;

• корректировки продольного распределения давлений на основе интегрального условия неразрывности;

• пересчета скоростей;

• последующего сплайнового сглаживания результатов и одновременного сгущения сетки;

• подключения схемы расщепления по трем пространственным направлениям, на основе полной k-эпсилон модели турбулентности [1-3] с ее численной реализацией до момента установления.

Соответственно этим пунктам далее описаны этапы разработанного алгоритма.

Подробнее о решении системы уравнений (1-5) дается также информация в работах [8, 9].

На первом этапе этого алгоритма вводится модель турбулентности, которая принимается для замыкания системы модельных уравнений, сначала она может быть простой. Например, по области интегрирования. Этот коэффициент обычно принимается прямо пропорциональным высоте области винтообразного течения и скорости набегающего потока в соответствии с экспериментами И. Л. Розовского по его формуле [9]

$$\nu_t = 0{,}05 u_0 \sigma ,$$

где u_0 – средняя начальная скорость, σ – высота донной гряды.

Основная цель этого этапа – охватить всю область единственным расчетом, и достичь сходимости алгоритма в целом. Отметим, что именно неявная схема является абсолютно сходящейся.

Систему уравнений (1) запишем в следующем виде (на примере 1-го уравнения этой системы)

$$\overset{\circ}{u}\frac{\partial u}{\partial x} + \overset{\circ}{v}\frac{\partial u}{\partial y} + \overset{\circ}{w}\frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x} + \gamma\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right), \qquad (6)$$

где u, v, w – поле скоростей; X, Y, Z – массовые силы соответственно вдоль осей OX, OY, OZ; ρ – плотность воды, известная постоянная или

переменная по области при заданной температуре и солености; P – известное во всей области поле давления; γ – турбулентная вязкость.

Значения скоростей $\overset{\circ}{u},\overset{\circ}{v},\overset{\circ}{w}$ считаются заранее известными по всей расчетной области, включая значения на границах Г области. Они задаются в конечно разностном аналоге уравнения (6) и его граничных условиях (7) на основании данных экспериментов, проведенных предварительно автором [1, 7], или могут быть откорректированы исходя из опыта гидравлических экспериментов с такими течениями. Этот шаг является реализацией известного метода линеаризации.

Граничные условия запишем так

$$u|_{\Gamma}=\overset{\circ}{u}|_{\Gamma},v|_{\Gamma}=\overset{\circ}{v}|_{\Gamma},\ w|_{\Gamma}=\overset{\circ}{w}|_{\Gamma}. \quad (7)$$

Выполним построение разностных аналогов уравнений динамики жидкости. На пространственной области в виде параллелограмма с известными значениями высоты *L*, ширины *M* и длины *N* введем сетку:

$$\omega_{\Delta X,\Delta Y,\Delta Z}=\omega_{\Delta X}\times\omega_{\Delta Y}\times\omega_{\Delta Z}, \quad (8)$$

где $\omega_{\Delta X}=\left\{i\cdot\Delta X: i=\overline{0,n};\Delta X=\frac{N}{n}\right\}$,

$\omega_{\Delta Y}$ и $\omega_{\Delta Z}$ представляются аналогично.

Дифференциальная система (6) – (7) решается с помощью метода конечных разностей [9] на разреженной равномерной сетке

$$\omega_1=\left\{(x_i,y_j,z_k): x_i=i\cdot\Delta x, y_j=j\cdot\Delta y, z_k=k\cdot\Delta z, i=\overline{0,n}, j=\overline{0,m}, k=\overline{0,\gamma}\right\},$$

где $\Delta x=N/n$, $\Delta y=M/m$, $\Delta z=K/l$ – расстояние между узлами сетки соответственно по координатам x, y, z; N, M, K – длина, ширина и высота исследуемой области; n, m, γ – количество узлов по длине, по ширине и по высоте сетки.

Разностный аналог системы дифференциальных уравнений (1) записывается в форме следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$u_{i+1,j,k}\left(\frac{\tilde{u}_{i,j,k}}{2\Delta x}-\frac{1}{\Delta x^2}\right)-u_{i-1,j,k}\left(\frac{\tilde{u}_{i,j,k}}{2\Delta x}+\frac{1}{\Delta x^2}\right)+u_{i,j+1,k}\left(\frac{\tilde{v}_{i,j,k}}{2\Delta y}-\frac{1}{\Delta y^2}\right)-$$
$$-u_{i,j-1,k}\left(\frac{\tilde{v}_{i,j,k}}{2\Delta y}+\frac{1}{\Delta y^2}\right)+u_{i,j,k+1}\left(\frac{\tilde{w}_{i,j,k}}{2\Delta z}-\frac{1}{\Delta z^2}\right)-u_{i,j,k-1}\left(\frac{\tilde{w}_{i,j,k}}{2\Delta z}+\frac{1}{\Delta z^2}\right)+$$
$$+u_{i,j,k}\left(\frac{2}{\Delta x^2}+\frac{2}{\Delta y^2}+\frac{2}{\Delta z^2}\right)=\frac{X_{i,j,k}}{\nu_t}-\frac{p_{i+1,j,k}-p_{i-1,j,k}}{2\Delta x\nu_t\rho}, \quad (9)$$

$$v_{i+1,j,k}\left(\frac{\tilde{u}_{i,j,k}}{2\Delta x}-\frac{1}{\Delta x^2}\right)-v_{i-1,j,k}\left(\frac{\tilde{u}_{i,j,k}}{2\Delta x}+\frac{1}{\Delta x^2}\right)+v_{i,j+1,k}\left(\frac{\tilde{v}_{i,j,k}}{2\Delta y}-\frac{1}{\Delta y^2}\right)-$$
$$-v_{i,j-1,k}\left(\frac{\tilde{v}_{i,j,k}}{2\Delta y}+\frac{1}{\Delta y^2}\right)+v_{i,j,k+1}\left(\frac{\tilde{w}_{i,j,k}}{2\Delta z}-\frac{1}{\Delta z^2}\right)-v_{i,j,k-1}\left(\frac{\tilde{w}_{i,j,k}}{2\Delta z}+\frac{1}{\Delta z^2}\right)+$$
$$+v_{i,j,k}\left(\frac{2}{\Delta x^2}+\frac{2}{\Delta y^2}+\frac{2}{\Delta z^2}\right)=\frac{Y_{i,j,k}}{\nu_t}-\frac{p_{i,j+1,k}-p_{i,j-1,k}}{2\Delta y\nu_t\rho}, \quad (10)$$

$$w_{i+1,j,k}\left(\frac{\widetilde{u}_{i,j,k}}{2\Delta x}-\frac{1}{\Delta x^2}\right)-w_{i-1,j,k}\left(\frac{\widetilde{u}_{i,j,k}}{2\Delta x}+\frac{1}{\Delta x^2}\right)+w_{i,j+1,k}\left(\frac{\widetilde{v}_{i,j,k}}{2\Delta y}-\frac{1}{\Delta y^2}\right)-$$
$$-w_{i,j-1,k}\left(\frac{\widetilde{v}_{i,j,k}}{2\Delta y}+\frac{1}{\Delta y^2}\right)+w_{i,j,k+1}\left(\frac{\widetilde{w}_{i,j,k}}{2\Delta z}-\frac{1}{\Delta z^2}\right)-w_{i,j,k-1}\left(\frac{\widetilde{w}_{i,j,k}}{2\Delta z}+\frac{1}{\Delta z^2}\right)+$$
$$+w_{i,j,k}\left(\frac{2}{\Delta x^2}+\frac{2}{\Delta y^2}+\frac{2}{\Delta z^2}\right)=\frac{Z_{i,j,k}}{\nu_t}-\frac{p_{i,j,k+1}-p_{i,j,k-1}}{2\Delta z\,\nu_t\rho}\quad . \qquad (11)$$

Такую систему решаем одним из более экономичных известных способов – LU-алгоритмом.

На втором этапе алгоритма для ускорения расчетов и улучшения сходимости алгоритма определяется полный перепад давлений на всей области путем удовлетворения интегральному условию неразрывности по всей области

$$\left|\iint\limits_{(S_i)}U(y,z)dydz-\iint\limits_{(S_{i-1})}U(y,z)dydz\right|\le\varepsilon\left|Q_i-Q_{i-1}\right|\quad , \qquad (12)$$

где $U(y,z)$ – поле скорости в поперечном сечении расчетной области; ε – константа, которая обеспечивает уровень точности приближенного вычисления поля давления ($\varepsilon=0{,}0001$), которая множится на абсолютную величину разности расходов поступательного движения потока в рассматриваемой области винтообразного течения в двух ее соседних сечениях.

Определение общего перепада давления, приближенно задаваемого из эксперимента, производится исходя из внешних гидравлических условий обтекания рассматриваемой области. Например, имеются эмпирические сведения о перепадах давления, замеренные в лабораторных условиях при обтекании донного уступа в прямолинейном лотке спокойным потоком [6, 9]. Предварительное определение этого перепада позволяет ускорить алгоритм расчета, обеспечить его быструю сходимость и устойчивость.

На третьем этапе алгоритма корректируется поле давлений с помощью известного уравнения Пуассона для поля осредненного давления (13) [8, 9]. Оно получено путем применения операции дивергенции к системе уравнений динамики (1) с учетом неразрывности (2)

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial z^2}=2\rho\left\{\frac{\partial^2\gamma_{\text{T}}}{\partial x^2}\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial^2\gamma_{\text{T}}}{\partial y^2}\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial^2\gamma_{\text{T}}}{\partial z^2}\frac{\partial w}{\partial z}+\frac{\partial^2\gamma_{\text{T}}}{\partial x\partial y}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\right.$$
$$\frac{\partial^2\gamma_{\text{T}}}{\partial x\partial z}\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)+\frac{\partial^2\gamma_{\text{T}}}{\partial y\partial z}\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)-\frac{1}{3}\left(\frac{\partial^2 k}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 k}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 k}{\partial z^2}\right)-\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial z}\frac{\partial w}{\partial x}-$$
$$\left.-\frac{\partial v}{\partial z}\frac{\partial w}{\partial y}\right\}-\rho\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right]. \qquad (13)$$

Для нахождения численного решения этого уравнения предлагается использовать итерационный метод последовательной верхней релаксации (ПВР) [8, 9], который разрешает значительно уменьшить число итераций по сравнению с обычными итерационными схемами. Расчетные зависимости для определения значения величины давления во внутреннем узле расчетной области в случае использования метода ПВР имеют вид

$$p_{ijk}^{\tau+1}=\frac{\lambda}{2\left(\Delta y^2\Delta z^2+\Delta x^2\Delta y^2+\Delta x^2\Delta z^2\right)}\left(\Delta y^2\Delta z^2\left(p_{i+1,jk}^{\tau}+p_{i-1,jk}^{\tau+1}\right)+\Delta x^2\Delta z^2\times\right. \quad \ldots(14)$$
$$\left.\times\left(p_{ij+1,k}^{\tau}+p_{ij-1,k}^{\tau+1}\right)+\Delta x^2\Delta y^2\left(p_{ijk+1}^{\tau}+p_{ijk-1}^{\tau+1}\right)-\Delta x^2\Delta y^2\Delta z^2F_{ijk}\right)+(1-\lambda)p_{ijk}^{\tau},$$

где λ– коэффициент релаксации; F_{ijk} – разностный аналог кинематической функции, которая находится в правой части уравнения (13); τ – номер итерации.

Идея сплайнового сглаживания результатов реализуется на четвертом этапе алгоритма. Для того чтобы избежать больших затрат машинных ресурсов и повысить точность вычисления возникла идея решать задачу расчета турбулентного водного потока по неявной схеме на укрупненной расчетной сетке, а затем осуществлять сгущение сетки за счет сплайновой аппроксимации найденных распределений проекций осредненных во времени скоростей на направления координатных осей u_z, v_z, w_z и соответствующего поля давления P(x, y, z).

В результате получаются более подробные поля скоростей и давлений, отображенные на сгущенной сетке. Далее кинематические характеристики течения уточняются с помощью явной схемы расщепления Мак-Кормака. Аппроксимация найденных неявным алгоритмом скоростей и осуществляется за счет интерполяции кубическими сплайнами, полиномами вида (15)

$$S_i(x)=a_i+b_i(x-x_i)+\frac{c_i}{2}(x-x_i)^2+\frac{d_i}{6}(x-x_i)^3 \quad . \qquad (15)$$

Именно такие сплайны, принятые в работе, имеют наиболее экономичный вид, т.е. содержат минимально необходимое количество членов.

В качестве примера на рис. 1 и 2 показан выполненный, с использованием описанной методики, расчет и анализ кинематических и динамических характеристик потока в отрывной области за донным косо расположенным относительно потока уступом.

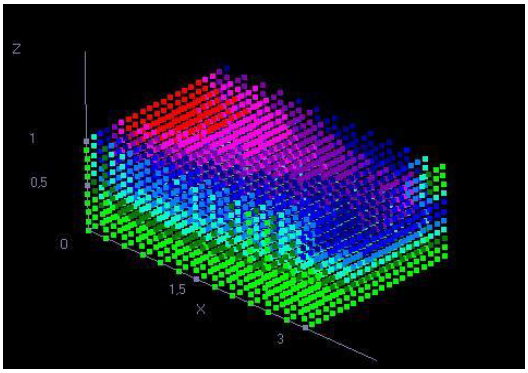


Рис. 1. Трехмерная расчетная картина течений (скоростей U) по области при скорректированном поле давлений
Fig. 1. Three-dimensional calculated flow pattern (U velocities) by area with adjusted pressure field

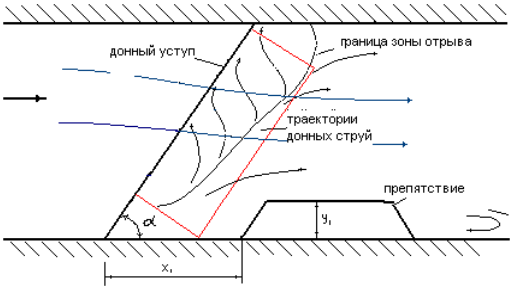


Рис. 2. Схема движения потока в отрывной области за донным уступом и расчетной области
Fig. 2. Flow flow diagram in the separation area behind the bottom ledge and the design area

Для верификации разработанной модели применялся метод основанный на обработки видеоизображений водной среды. Благодаря использованию опытного образца прибора «Визуализатор потока» [10] были получены данные о структуре течения в районе мостовых опор на р. Черной. На рисунке 3 представлены результаты обработки видеоряда с построенным полем скорости течения.

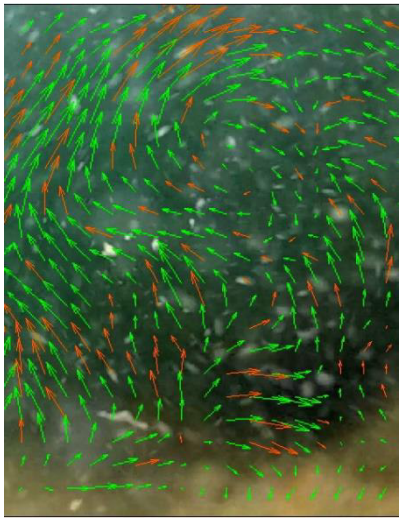


Рис. 3. Поле скорости течения в придонной области в районе автомобильного моста р. Чёрная (г. Севастополь)
Fig. 3. The flow velocity field in the bottom region near the Chernaya River road bridge (Sevastopol)

На данном рисунке четко прослеживается структура течения, видно наличие зон с минимальным течением у дна и турбулентного потока в верхней области.

Выводы. Стихийное возникновение винтообразных течений в природе бывает чрезвычайно опасным, именно они обусловливают наибольшие глубины местных размывов у берегозащитных сооружений, оголовков бун и полузапруд, а также у мостовых опор. Повышение турбулентности, крупномасштабных пульсации давления, особенно в зоне начала вихревого вальца, приводящие к значительному по интенсивности размыва и эффективному переносу размытого материала вдоль оси винта и распространению по акватории. Они способствуют возникновению в потоке дополнительных циркуляционных течений слабого типа, а также интенсификации некоторых литодинамических процессов, переносу наносов и связанных с ним изменений конфигурации дна, также к развитию размывов, переработке наносных вредных отложений, находящихся в размываемом грунте, местному ухудшению качества воды. Применение разработанной модели позволяет определять касательные напряжения на поверхности дна и в любой точке рассматриваемой области потока. Значение этих напряжений, в свою очередь позволяют оценить развивающую способность потока, возможность образования наносных отложений и интенсивность турбулентности, определяющую массообменные характеристики. Применённая методика визуализации вторичных течений на основе PIV метода, позволяющая построить векторные поля скорости течения на разных горизонтах и визуализировать структуру потока воды.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функциониро-

вание и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования») и *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».*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Офицеров А.С.* Вторичные течения. Госиздат. литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, М., 1959. 163 с.

2. *Потапов М.В.* Сочинения. Том 1–2. Сельхозиздат, М., 1951.

3. *Милович А.Я.* Основы динамики жидкости. Госэнергоиздат, М. 1933. 159 с.

4. *Козыренко Л.Д.* Вторичные течения и взвешивания наносов // Сборник трудов МИСИ, 1968, выпуск 1, номер 55 С. 93– 02.

5. *Михайлова Н.А.* Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. М. Гидрометеоиздат, 1966. 236 с.

6. *Щодро А.Е.* Кинематика потока и водообмен за косорасположенными донными уступами гидротехнических сооружений // Гидравлика и гидротехника: Респ. межвед. научно–техн. сборник. К.: Техніка, 1978. Вып. 26. С. 59–64.

7. *Schodro, A.E.* River bed deformations near banks and hydraulic structures due to river flow // WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 104, 2007, P. 381–387.

8. *Савенко В.Я.* Математические модели и методы расчета квазитрехмерных безнапорных потоков. К.: Техника, 1995. 188 с.

9. *Ходневич Я.В.* Математичне моделювання просторових течій з врахуванням інтегральної умови нерозривності // Збірник наукових праць «Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво». Випуск 31. Рівне. 2007, С. 287–292.

10. *Антоненков Д.А.* Измерительный комплекс для исследования динамических характеристик и структуры течения водного потока в прибрежной морской зоне // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 12. С. 1112—1118. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1112-1118.

HYDRODYNAMIC MODEL FOR CONTROL OF THE STRUCTURE OF SECONDARY FLOWS AND THEIR VISUALIZATION IN AREAS OF SHARPLY UNEVEN FLOW MOVEMENT IN RIVER ESTUARIES

D. A. Antonenkov[1], A. E. Shchodro[2]

[1]Marine Hydrophysical Institute of RAS, RF, Sevastopol, Kapitanskaya St., 2
[2]Institute of natural and technical systems, RF, Sevastopol, Lenina St., 28

The article describes a hydrodynamic model of the structure of a developed turbulent flow in the spatial zone of flow separation behind an obliquely located obstacle in areas of sharply uneven flow movement. The use of such a model makes it possible to determine tangential stresses on the bottom surface and at any point in the considered flow region. The value of these stresses, in turn, allows us to assess the developing ability of the flow, the possibility of formation of sediments and the intensity of turbulence, which determines the mass-exchange characteristics. A technique for visualizing secondary flows based on the PIV method is considered, which allows constructing vector fields of flow velocity at different horizons and visualizing the structure of the water flow.

Keywords: flow, sediments, estuaries, hydraulic structures, design, modeling.

REFERENCES

1. *Ofitserov A.S.* Vtorichnye techeniya (Secondary currents). Gosizdat. literatury po stroitel'stvu, arkhitekture i stroitel'nym materialam, Moscow, 1959, 163 p.

2. *Potapov M.V.* Sochineniya (Works). Vol. 1–2, Sel'khozizdat, Moscow, 1951.

3. *Milovich A.YA.* Osnovy dinamiki zhidkosti (Fundamentals of Fluid Dynamics). Gosehnergoizdat, Moscow, 1933, 159 p.

4. *Kozyrenko L.D.* Vtorichnye techeniya i vzveshivaniya nanosov (Secondary flows and sediment weighing). Sbornik trudov MISI, 1968, Vol. l, No. 55, pp. 93–102.

5. *Mikhailova N.A.* Perenos tverdykh chastits turbulentnymi potokami vody (Transport of solid particles by turbulent water flows). Moscow, Gidrometeoizdat, 1966, 236 p.

6. *Shchodro A.E.* Kinematika potoka i vodoobmen za kosoraspolozhennymi donnymi ustupami gidrotekhnicheskikh sooruzhenii (Flow kinematics and water exchange behind oblique bottom ledges of hydraulic structures). Gidravlika i gidrotekhnika: Resp. mezhved. nauchntekhn. Sbornik, K.:Tekhnika, 1978, Vol. 26, pp. 59–64.

7. *Schodro A.E.* River bed deformations near banks and hydraulic structures due to river flow. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 104, 2007, pp. 381–387.

8. *Savenko V.YA.* Matematicheskie modeli i metody rascheta kvazitrekhmernykh beznapornykh potokov (Mathematical models and methods for calculating quasi-three-dimensional non-pressure flows). K.: Tekhnika, 1995, 188 p.

9. *Khodnevich YA.* V. Matematichne modelyuvannya prostorovikh techii z vrakhuvannyam integral'noï umovi nerozrivnosti (Mathematical modeling of spatial flows taking into account the integral condition of discontinuity). Zbirnik naukovikh prats' “Gidromelioratsiya ta gidrotekhnichne budivnitstvo”, Vol. 31, Rivne, 2007, pp. 287–292.

10. *Antonenkov D.A.* Izmeritel'nyi kompleks dlya issledovaniya dinamicheskikh kharakteristik i struktury techeniya vodnogo potoka v pribrezhnoi morskoi zone (Measuring complex for studying the dynamic characteristics and structure of the water flow in the coastal marine zone). Izv. vuzov. *Priborostroenie*, 2020, Vol. 63, No 12, pp. 1112–1118. DOI 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1112-1118.

УДК 004.56 DOI: 10.33075/2220-5861-2022-4-133-142

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МНОГОУРОВНЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА КАНАЛОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА БТС ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Д.В. Моисеев, А.В. Скатков, А.А. Брюховецкий

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

Статья посвящена вопросам построения математических моделей и методов многоуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств. Специфичными для каналов связи между беспилотными транспортными средствами являются такие их особенности, как нерегулярный трафик, критичность передаваемой информации (по времени передачи и содержанию), и, как следствие, необходимость в организации высокой пропускной способности, помехозащищенности и надёжности передающих каналов. Предложенные авторами математические модели и методы многоуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств, позволяют выполнять многоуровневую оптимизацию структурного синтеза каналов информационного обмена.

Ключевые слова: беспилотное транспортное средство, каналы информационного обмена, киберфизические системы, система контроля окружающей среды.

Поступила в редакцию: 16.09.2022. После доработки: 17.10.2022.

Введение. В настоящее время системы контроля окружающей среды (СКОС) представляют собой важнейшее средство анализа состояния системы критически важных объектов [1]. В настоящее время особенно насущны проблемы, связанные с контролем загрязнения грунта, воздушной среды, морских и речных акваторий. В связи с этим возникает объективная потребность разработки методов и средств, предназначенных для реализации системы непрерывного мониторинга ключевых показателей окружающей среды и прогнозирования возникновения аномальных состояний экосистем [2]. Зачастую наиболее оптимальным является применения беспилотных транспортных средств (БТС) для решения данных задач мониторинга.

Многие ведущие страны мира, опираясь на принципы сетецентрического управления, активно ведут исследования коммуникаций смешанных робототехнических группировок, взаимодействующих в едином информационно-управляющем пространстве «Умных городов», что, в свою очередь, требует реализации эффективных каналов информационного обмена (КИО) между БТС и диспетчерскими центрами (ДЦ), являющимися неотъемлемой частью таких киберфизических систем [3].

Специфичными для каналов связи между беспилотными транспортными средствами и диспетчерскими центрами являются такие особенности, как нерегулярный трафик, критичность передаваемой информации (по времени передачи и содержанию), и, как следствие, необходимость в организации высокой пропускной способности, помехозащищенности и надёжности передающих каналов. Поэтому поиск путей комплексного использования разнородных каналов связи является важной и актуальной задачей, решение которой требует модернизации принципов в организации управления БТС (в том числе и находящихся в смешанной группе при решении общей миссии) на глобальном удалении от диспетчерского центра [4–7].

Данная работа выполнялась при частичной поддержке РФФИ в рамках грантов 19-29-06023 мк «Методы структурного синтеза каналов информационного обмена между беспилотным транспортным средством и диспетчерским центром на основе стохастического векторного программирования с вероятностными критериями» и № 19-29-06015 мк «Адаптивные нейросетевые методы обнаружения уязвимостей интерфейсов беспилотных транспортных средств на основе искусственных иммунных систем».

Целью статьи является построение математических моделей и методов многоуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств для систем контроля окружающей среды.

Постановка и решение проблемы. Процедура многоуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена предполагает определенный порядок синтеза:

– первоначально определяется синтез каналов информационного обмена подсети Z_l;

– затем для сформированного решения по синтезу подсети Z_l определяется решение по синтезу узла сети G_m.

Следует отметить, что для каждого узла сети G_m формируются матрицы модельных решений $X_{i,j}$

$$X_{ij} = \begin{vmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,j} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{i,1} & \cdots & x_{i,j} \end{vmatrix}, \qquad (1)$$

где $x_{i,j}$ - бинарное значение использование канал для передачи от i-ого источника j-му приёмнику; I – количество источников; J – количество приёмников.

Ранее авторами для построения матриц модельных решений $X_{i,j}$ были получены следующие модели [3, 6, 8]:

– модель минимизации временных потерь (Т-модель), связанных с обеспечением информационного обмена (обеспечение критичности информационного обмена в различных ситуациях);

– модель максимизации надёжностных функций обеспечения информационного объёма (Р-модель);

– модель максимизации показателей помехозащищённости и криптостойкости передаваемых сообщений (К-модель) (гарантийная достоверность и конфиденциальность передаваемых по информационным каналам данных в условиях дестабилизирующих воздействий естественного и искусственного характера);

– модель минимизации стоимостных показателей каналов информационного обмена (С-модель).

Для однородности решаемых задач Р-модель и К-модель, преобразуем к следующему виду:

– модель минимизации вероятности отказа при обеспечении информационного объёма (1-Р -модель);

– модель минимизации уязвимости передаваемых сообщений (1-К-модель).

Для понимания механизмов многоуровневой оптимизации [9-13] рассмотрим простейший пример двухуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена, для которой:

– на первом уровне выполняется оптимизация по значениям частных критериев и формирование картежей альтернативных вариантов реализации структурного синтеза каналов информационного обмена: «С, 1-Р, Т, 1-К»;

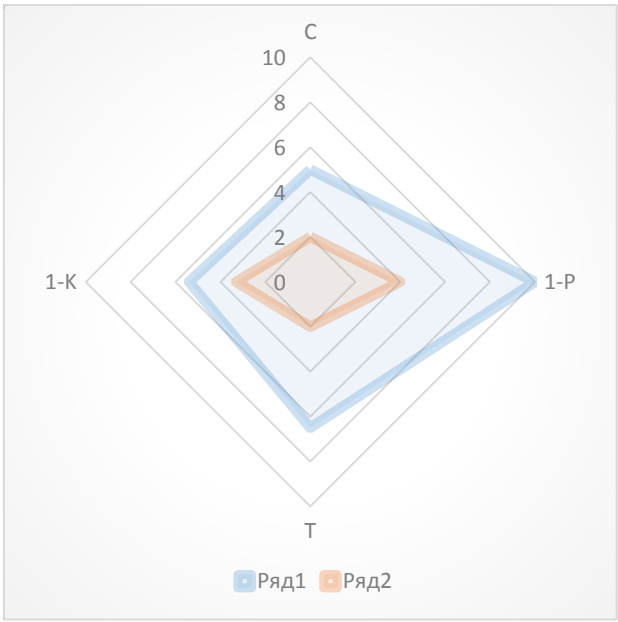
– на втором уровне происходит оптимизация распределения ресурсов (процессорного времени, памяти, ширины канала информационного обмена).

I-й уровень оптимизации. Как известно, наибольшую сложность при реализации конкретных СППР представляет собой нахождение элементов оценочных матриц.

В предлагаемом авторами варианте эта проблема разрешается естественным способом на основе решений, полученных с использованием построенного ранее полимодального комплекса [3, 6, 8, 12–13]. Эти решения позволяют

найти значения частных критериев и сформировать картежи альтернативных вариантов реализации структурного синтеза каналов информационного обмена: «С, 1-Р, Т, 1-К».

Для использования геометрической интерпретации рассматриваются проекции четырехмерного критериального пространства на двумерную декартовую плоскость СРТКО с взаимно перпендикулярными осями, (рис. 1).



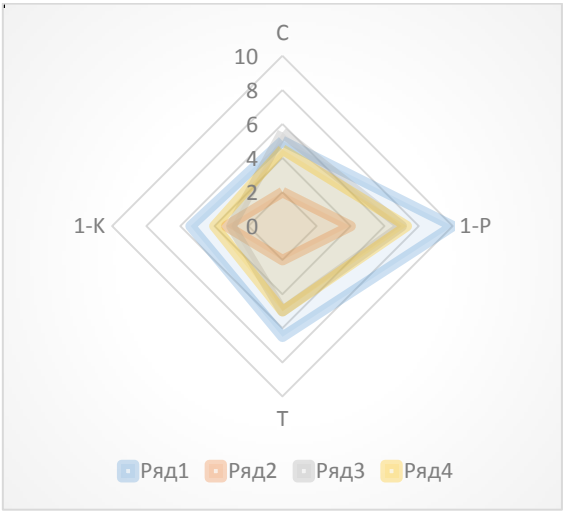
1 – текущее значение критериев до оптимизации; 2 – минимально возможные значения критериев

Рис. 1. Геометрическая интерпретация проекции четырехмерного критериального пространства
Fig. 1. Geometric interpretation of the projection of a four-dimensional criterion space

Как становится видно из рис. 1 необходимо рассматривать разность площадей четырёхугольников 1 и 2 и решать задачу на минимизацию данной разности. Причём все четырёхугольники меньшей площади, чем 1 являются более эффективными при альтернативных вариантах реализации структурного синтеза каналов информационного обмена. Следует отметить, что в первую очередь следует рассматривать «равномерные» решения по критериям, когда каждый критерий находится внутри базового четырёхугольника 2 (рис. 2).

Как следует из рис. 2, четырёхугольники, соответствующие решениям 3 и 4 имеют равную площадь, однако решение 4 является предпочтительнее, т.к. каждый его критерий находится внутри базового четырёхугольника 2.

Применение известных классических критериев часто приводит к тому, что использование различных критериев плохо согласуются, что не позволяет в достаточной степени ЛПР оценить все риски от последствий принимаемых решений и, тем самым, обосновать использование тех или иных вариантов реализации структурного синтеза каналов информационного обмена. Для того чтобы поддержать процесс принятия решений экспертом предлагается геометрическая интерпретация схемы принятия решений и сравнения вариантов систем.



1 – текущее значение критериев до оптимизации; 2 – минимально возможные значения критериев; 3 –вариант оптимизации 1; 4 –вариант оптимизации 2

Рис. 2. Геометрическая интерпретация проекции четырехмерного критериального пространства, на I-м уровне оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена

Fig. 2. Geometric interpretation of the projection of a four-dimensional criterion space, at the I-th level of optimization of the structural synthesis of information exchange channels

Рассмотрим пример оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена используя модель минимизации стоимостных показателей каналов информационного обмена (С-модель).

Для этого на втором уровне оптимизации выполним минимизацию стоимости передачи данных С путем выбора таких элементов четырехмерной матрицы $H_{C,T,P,K}$ при выполнении ограничений на время передачи информации, вероятность безотказной работы, уровень криптостойкости и выполнения условия (2).

$$C = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L} t_{ijkl}\cdot c_{ijkl}\cdot w_{ijkl}\cdot h_{ijkl} = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L}\left(cs_{ijkl} + ck_{ijkl} + +cf_{ijkl}\right)\cdot t_{ijkl}\cdot w_{ijkl}\cdot h_{ijkl} \to min,$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L} t_{ijkl}\cdot h_{ijkl} = \\ &= \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L}\left(ts_{ijkl} + tk_{ijkl} + tf_{ijkl}\right)\cdot h_{ijkl} < T_0 \\ P &= \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L} exp\left(-\lambda s_{ijkl} - \lambda k_{ijkl} - \lambda f_{ijkl}\right)\cdot t_{ijkl}\cdot h_{ijkl} > P_0 \\ Q &= \sum_{l\in L}\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\left(KSL_{ijkl} + KKLk_{ijkl} + KfL_{ijkl}\right)\cdot h_{ijkl}\cdot t_{ijkl} > K_0 \\ &\left(\sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{l\in L} h_{ijkl}\right)\cap\left(x_{ijkl}\in B\right) = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

Основные переменные, образующие исходный факторный базис:

W_{ijkl} – объём передачи данных от i-ого источника к k-му приемнику посредством j-го канала за операционную единицу времени с использованием шифра типа l;

V_{ijkl} – скорость передачи данных от i-ого источника к k-му приемнику посредством j-го канала с использованием шифра l;

t_{ijkl} – время передачи данных от *i*-ого источника к *k*-му приемнику посредством *j*-го канала с использованием шифра *l*;

C_{ijkl} – стоимость передачи единицы объема данных от *i*-ого источника к *k*-му приемнику посредством *j*-го канала с использованием шифра *l*;

λs_{ijkl} – интенсивность отказов (сбоев) при подготовке информации от *i*-ого источника к *k*-му приемнику посредством *j*-го канала с использованием шифра *l*;

λk_{ijkl} – интенсивность отказов (сбоев) в канале при передаче информации от *i*-ого источника к *k*-му приемнику посредством *j*-го канала с использованием шифра *l*;

λf_{ijkl} – интенсивность отказов (сбоев) при приеме информации от *i*-ого источника к *k*-му приемнику посредством *j*-го канала с использованием шифра *l*;

h_{ijkl} – первоначально неизвестные величины, подлежащих определению в результате решения комплекса оптимизационных задач.

Элементы матрицы $H_{C,T,P,K}$ являются булевскими величинами, т.е. $x_{ijkl} \in B$, где B – множество булевых чисел, которые равны единице, если выбрано для реализации допустимое ребро в двудольном графе *Y* рассматриваемой задачи, и равны нулю в противном случае.

В таком случае решение этой задачи, если оно существует, позволяет найти план использования заданной сети каналов узла G_m подсети Z_l с таким назначением каналов передачи информации между всеми источниками и приемниками, который минимизирует стоимость телекоммуникации при обеспечении требуемого уровня отказоустойчивости, криптостойкости, а также времени передачи.

Аналогично С-модели находятся решения для 1-Р, Т, 1-К – моделей.

II-й уровень оптимизации. В рассматриваемой авторами задаче синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств для систем контроля окружающей среды выделяются следующие виды ресурсов R_{lj}:

– процессорные устройства (процессорное время) R_{1j};

– информационные каналы (ширина пропускной способности) R_{2j};

– устройства памяти (объём выделяемой памяти) R_{3j}.

Аналогично с I-м уровнем оптимизации необходимо рассматривать разность площадей, в данном случае симплексов, 1 и 2 и решать задачу на минимизацию данной разности (рис. 3).

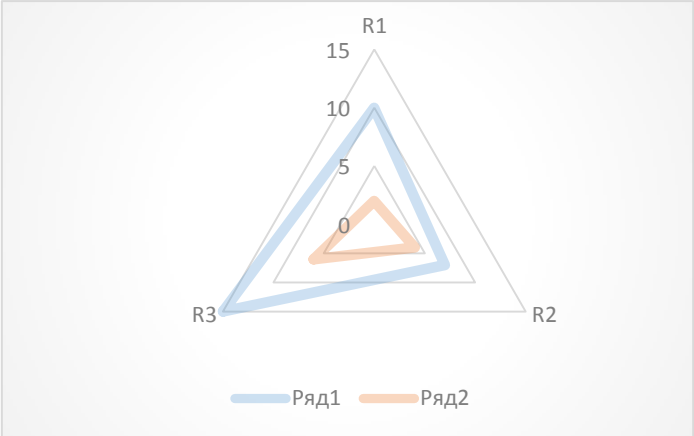


Рис. 3. Геометрическая интерпретация проекции трёхмерного критериального пространства, на II-м уровне оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена

Fig. 3. Geometric interpretation of the projection of a three-dimensional criterion space, at the II-th level of optimization of the structural synthesis of information exchange channels

Аналогично, все симплексы меньшей площади, чем 1 являются более эффективными при альтернативных вариантах реализации структурного синтеза каналов информационного обмена. Также в первую очередь следует рассматривать «равномерные» решения по критериям, когда каждый критерий находится внутри базового симплекса 2.

На рис. 4 представлена блок схема двухуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств для систем контроля окружающей среды.

В состав предложенной схемы входят:

– модуль предварительного анализа и оценивания качества входных данных, предназначенный для контроля корректности поступающих на вход системы данных;

– подсистема первого уровня оптимизации, содержащая:

– модель минимизации стоимостных показателей каналов информационного обмена (С-модель);

– модель минимизации вероятности отказа при обеспечении информационного объёма (1-Р-модель);

– модель минимизации уязвимости передаваемых сообщений (1-К-модель);

– модель минимизации временных потерь (Т-модель), связанных с обеспечением информационного обмена;

– модуль оценивания качества оптимизации по геометрической интерпретации проекций четырехмерного критериального пространства; предназначенная для оптимизации по значениям частных критериев и формирования картежей альтернативных вариантов реализации структурного синтеза каналов информационного обмена для систем контроля окружающей среды;

– подсистема второго уровня оптимизации, содержащая:

– модель минимизации использования процессорного времени;

– модель минимизации ширины пропускной способности канала;

– модель минимизации объёма выделяемой памяти;

– модуль оценивания качества оптимизации по геометрической интерпретации проекций симплексного критериального пространства;

– подсистему регулирования (управления) многоуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств, содержащую:

– модуль отбора множества геометрических решений;

– модуль поиска мощности области эффективных решений;

– модуль прогнозирования требуемого состояния КИО;

– модуль оценивания качества полученных решений;

– блок выдачи информации для ЛПР.

Таким образом можно выделить следующие преимущества многоуровневой оптимизации над одноуровневой:

– большая гибкость;

– большие функциональные возможности;

– уменьшение вычислительной сложности;

– перспективность для сетей (задач) большей размерности, например сетей 5G.

Заключение. Предложенные авторами математические модели и методы многоуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств, получены в результате выполнения грантов РФФИ 19-29-06023 мк «Методы структурного синтеза каналов информационного обмена между беспилотным транспортным средством и диспетчерским центром на основе стохастического векторного программирования с вероятностными критериями» и № 19-29-06015 мк «Адаптивные нейросетевые методы обнаружения уязвимостей интерфейсов беспилотных транспортных средств на основе искусственных иммунных систем» позволяют выполнять многоуровневую оптимизацию структурного синтеза каналов информационного обмена для беспилотных транспортных средств для реализа-

ции системы непрерывного мониторинга ключевых показателей окружающей среды и прогнозирования возникновения аномальных состояний экосистем. На примере двухуровневой оптимизации сначала выполняется решение оптимизационной задачи для каждого узла сети G_m формируются матрицы модельных решений $X_{i,j}$ результат задачи синтеза каналов информационного обмена по четырём критериям (стоимость передачи информации; время доставки сообщений; криптостойкость; вероятность безотказной работы), после чего выполняется оптимизации для подсети Z_l, содержащей узлы сети G_m, для всей сети Z по используемым ресурсам. Авторами построена обобщенная структурно-функциональная схема многоуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств для систем контроля окружающей среды. Данная модель может применяться в других предметных областях, где требуется оптимизация выбранных параметров, например, при обнаружении уязвимостей интерфейсов беспилотных транспортных средств в инфраструктуре умного города [2].

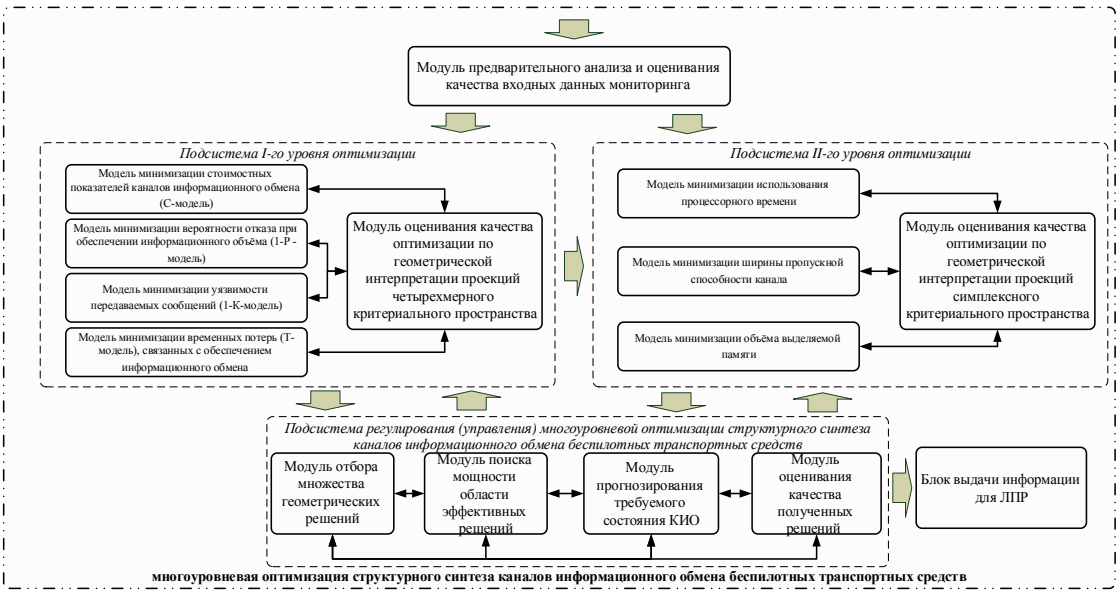


Рис. 4. Обобщенная структурно-функциональная схема многоуровневой оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена беспилотных транспортных средств
Fig. 4. Generalized structural and functional scheme of multilevel optimization of structural synthesis of information exchange channels of unmanned vehicles

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гайский В.А.* Надежность и точность систем контроля природной среды. Часть 3 // Системы контроля окружающей среды. 2020. № 4 (42). С. 111-118. DOI: 10.33075/2220-5861-2020-4-111-118.

2. *Скатков А.В., Брюховецкий А.А., Моисеев Д.В., Скатков И. А.* Роевой интеллект в задачах обнаружения аномалий и состояний природно-технических систем и объектов // Системы контроля окружающей среды. 2021. № 3 (45). С. 119–126. DOI 10.33075/2220-5861-2021-3-119-126.

3. *Скатков А.В., Моисеев Д.В., Брюховецкий А.А.* [и др.]. Структурный синтез каналов информационных обменов для беспилотных транспортных средств / Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2020. 320 с. ISBN 978-5-907310-88-9.

4. *Добрынин Д.А.* Беспилотные транспортные средства, современное состояние и перспективы // Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014 (24-27 сентября 2014 г., Казань, Россия): Труды конференции. Т.3. Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. 420 с. С. 265–274.

5. *Huang H.* Autonomy Levels for Unmanned Systems Framework, Volume I: Terminology, Version 1.1, Ed., NIST Special Publication 1011, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, September 2004.

6. *Скатков А.В., Моисеев Д.В., Брюховецкий А.А.* Разработка полимодельного комплекса оптимизации структурного синтеза каналов информационного обмена БТС // Дистанционные образовательные технологии: Сб. тр. VI Международной научно-практической конференции, Ялта, 20–22 сентября 2021 года. Симферополь: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство Типография «Ариал», 2021. С. 284–288.

7. *Зегжда Д.П.*, *Васильев Ю.С., Полтавцева М.А., Кефели И.Ф., Боровков А.И.* Кибербезопасность прогрессивных производственных технологий в эпоху цифровой трансформации // Вопросы кибербезопасности. 2018. №. 2 (26). С. 2–15.

8. *Моисеев Д.В., Моисеева И.Н., Бородин В.Д., Коломбет В.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613216 Российская Федерация. Полимодельный комплекс поддержки принятия решений по обеспечению надежности и высокой пропускной способности каналов информационного обмена: № 2022611985: заявл. 14.02.2022: опубл. 01.03.2022 / заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет».

9. *Lee E.A.* Cyber physical systems: Design challenges //11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). IEEE, 2008. С. 363–369.

10. *Макаренко С.И.* Перспективы и проблемные вопросы развития сетей связи специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 2. С. 18–68.

11. *Лосев Е.Ф., Мухитов Э.И.* Оптимизация управленческих задач технического обеспечения флота с помощью логистичесих систем // Военная мысль. 2008. № 8, С. 53–58.

12. *Давыдов А.Е.* Концептуальные подходы к построению адаптивных мультисервисных сетей специального назначения // НИИ Масштаб [Электронный ресурс]. 10.12.2012. URL:http://mashtab.org/company/massmedia/articles/konceptualnye_podhody_k_postroeniyu_adaptivnyh_multiservisnyh_setej_specialnogo_naznacheniya / (дата обращения 08.06.2017).

13. *Назаров А.Н., Сычев К.И.* Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. Красноярск: Изд-во ООО «Поликом», 2010. 389 с.

MATHEMATICAL MODELS AND METHODS OF MULTILEVEL OPTIMIZATION OF STRUCTURAL SYNTHESIS OF UMV INFORMATION EXCHANGE CHANNELS FOR ENVIRONMENTAL CONTROL SYSTEMS

D.V. Moiseev, A.V. Skatkov, A.A. Bryukhovetskiy

Federal State Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University»,
RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The article focuses on the construction of mathematical models and methods of multilevel optimization of structural synthesis of information exchange channels of unmanned vehicles. Specific to the communication channels between unmanned vehicles are their features such as irregular traffic, criticality of the transmitted information (in terms of transmission time and content), and, as a result, the need to organize high bandwidth, noise immunity and reliability of transmitting channels. The mathematical models and methods of multilevel optimization of the structural synthesis of information exchange channels of unmanned vehicles proposed by the authors make it possible to perform multilevel optimization of the structural synthesis of information exchange channels.

Keywords: unmanned vehicle, information exchange channels, cyber-physical systems, environmental control system.

REFERENCES

1. *Gajskij V.A.* Nadezhnost' i tochnost' sistem kontrolja prirodnoj sredy (Reliability and accuracy of environmental monitoring systems). Part 3. *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2020, № 4 (42), pp. 111–118. DOI 10.33075/2220-5861-2020-4-111-118.

2. *Skatkov A.V., Brjuhoveckij A.A., Moiseev D.V., and Skatkov I.A.* Roevoj intellekt v zadachah obnaruzhenija anomalij i sostojanij prirodno-tehnicheskih sistem i obektov (Swarm intelligence in the tasks of detecting anomalies and states of natural-technical systems and objects). *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*, 2021, № 3 (45), pp. 119–126. DOI 10.33075/2220-5861-2021-3-119-126.

3. *Skatkov A.V., Moiseev D.V., Brjuhoveckij A.A. and oth.* Strukturnyj sintez kanalov informacionnyh obmenov dlja bespilotnyh transportnyh sredstv (Structural synthesis of information exchange channels for unmanned vehicles). Simferopol': Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju “Izd-vo Tipografija “Arial”, 2020, p. 320. ISBN 978-5-907310-88-9.

4. *Dobrynin D.A.* Bespilotnye transportnye sredstva, sovremennoe sostojanie i perspektivy (Unmanned vehicles, current state and prospects). Chetyrnadcataja nacional'naja konferencija po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2014 (24–27 September 2014, Kazan', Russia): Trudy konferencii. T.3. Kazan': Izd-vo RIC “Shkola”, 2014, pp. 265–274.

5. *Huang, H.* Autonomy Levels for Unmanned Systems Framework, Volume I: Terminology, Version 1.1, NIST Special Publication 1011, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, September 2004.

6. *Skatkov A.V., Moiseev D. V., and Brjuhoveckij A.A.* Razrabotka polimodel'nogo kompleksa optimizacii strukturnogo sinteza kanalov informacionnogo obmena BTS (Development of a model complex for optimization of structural synthesis of BTS information exchange channels). Distancionnye obrazovatel'nye tehnologii: Sbornik trudov VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Jalta, 20–22 September, 2021, Simferopol': Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju “Izdatel'stvo Tipografija “Arial”, 2021, pp. 284–288.

7. *Zegzhda P., Vasil'ev Ju. S., Poltavceva M.A., Kefeli I.F., and Borovkov A.I.* Kiberbezopasnost' progressivnyh proizvodstvennyh tehnologij v jepohu cifrovoj transformacii (Cybersecurity of progressive production technologies in the era of digital transformation). Voprosy kiberbezopasnosti, №. 2 (26), 2018, pp. 2–15.

8. *Moiseev D.V., Moiseeva I.N., Borodin V.D., and Kolombet V.A.* Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2022613216 Rossijskaja Federacija. Polimodel'nyj kompleks podderzhki prinjatija reshenij po obespecheniju nadezhnosti i vysokoj propusknoj sposobnosti kanalov informacionnogo obmena: № 2022611985: zajavl. 14.02.2022: opubl. 01.03.2022; zajavitel' Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija "Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet".

9. *Lee E.A*. Cyber physical systems: Design challenges (Tsyber physical systems: Design challenges) 11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). IEEE, 2008, pp. 363–369.

10. *Makarenko S.I.* Perspektivy i problemnye voprosy razvitija setej svjazi special'nogo naznachenija (Prospects and problematic issues of the development of special-purpose communication networks). *Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti*, 2017, No. 2, pp. 18–68.

11. *Losev E.F. and Muhitov Je.I.* Optimizacija upravlencheskih zadach tehnicheskogo obespechenija flota s pomoshh'ju logistichesih system (Optimization of management tasks of technical support of the fleet with the help of logistics systems). Voennaja mysl', 2008, No. 8, pp. 53–58.

12. *Davydov A.E.* Konceptual'nye podhody k postroeniju adaptivnyh mul'tiservisnyh setej special'nogo naznachenija. NII Masshtab [Jelektronnyj resurs]. 10.12.2012. avalible at: http://mashtab.org/company/massmedia/articles/konceptualnye_podhody_k_postroeniyu_adaptivnyh_multiservisnyh_setej_specialnogo_naznacheniya / (June 08, 2017).

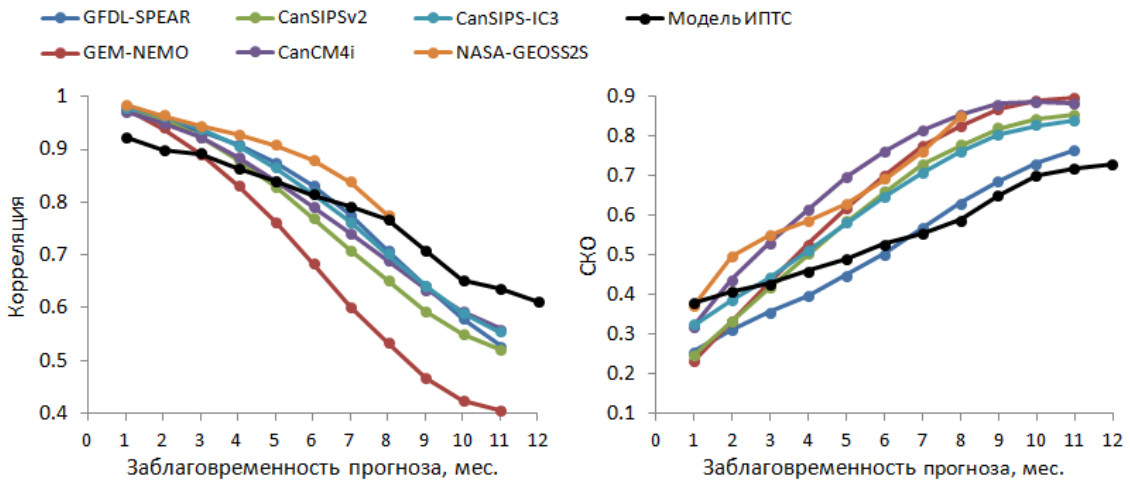
13. *Nazarov A.N. and Sychev K.I.* Modeli i metody rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovanija uzlovogo oborudovanija i strukturno-setevyh parametrov setej svjazi sledujushhego pokolenija. Krasnojarsk: Izd-vo OOO "Polikom", 2010, 389 p.

Научный прогноз: Начнется ли Эль-Ниньо в 2023 году?

Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) – важнейший глобальный процесс межгодового масштаба в системе океан-атмосфера экваториальной зоны Тихого океана. ЭНЮК имеет две противоположные фазы существования – теплую (Эль-Ниньо) и холодную (Ла-Нинья). Фазы ЭНЮК находят погодно-климатический отклик не только в тропической зоне Тихого океана, но и во внетропических широтах посредством дальнодействующих связей системы океан-атмосфера и обусловливают существенные негативные последствия на социально-экономическую сферу. Прогноз этих событий и заблаговременное определение их типа – приоритетная задачей современных исследований.

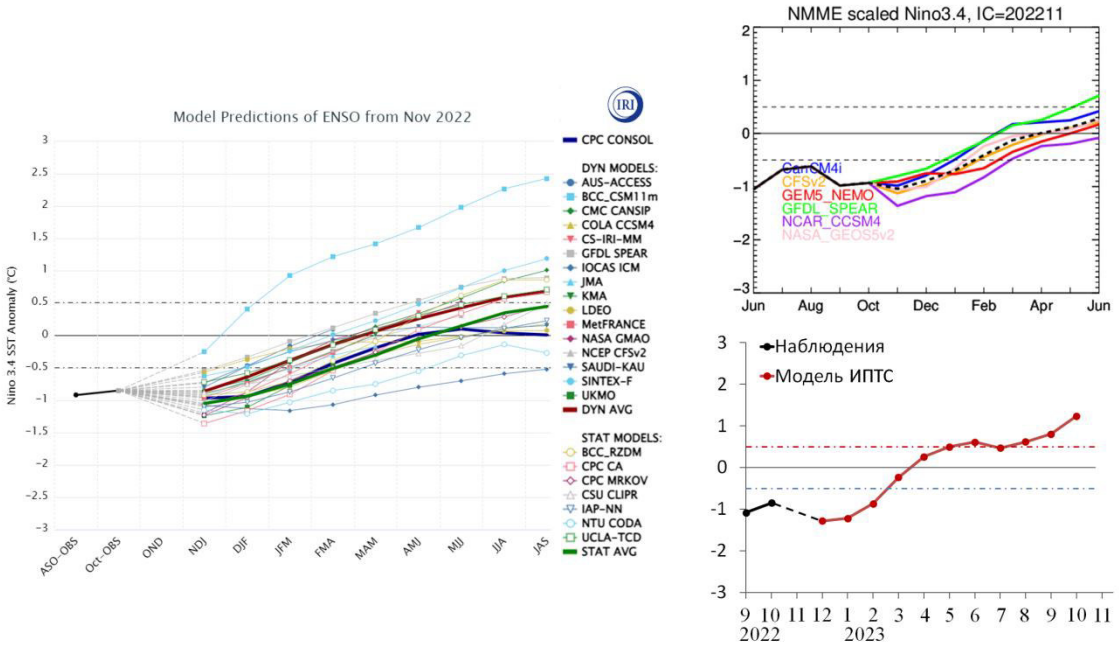
На сегодняшний день существует, по меньшей мере, 18 гидродинамических и 8 статистических моделей, представленных на сайте Колумбийского университета (IRI), которые применяются для прогнозирования ЭНЮК. Для всех моделей долгосрочного прогноза характерно относительно высокое качество моделирования нейтральных условий или уже развивающихся явлений ЭНЮК. Однако при увеличении периода заблаговременности, качество прогноза резко ухудшается. При этом динамические модели справляются с прогнозом ЭНЮК на порядок лучше, чем статистические. Известно успешное использование моделей, в основу которых положены искусственные нейронные сети (НС). Такой подход может существенно улучшить прогностические возможности моделирования ЭНЮК.

В Институте природно-технических систем (ИПТС) разработана модель, основанная на НС, способная прогнозировать состояние ЭНЮК и определять заблаговременно за год приближение явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Приведенная иллюстрация демонстрирует сравнение некоторых динамических моделей и модели ИПТС. Модель имеет значительное преимущество в сравнении с динамическими моделями при заблаговременном прогнозе более 6 месяцев.

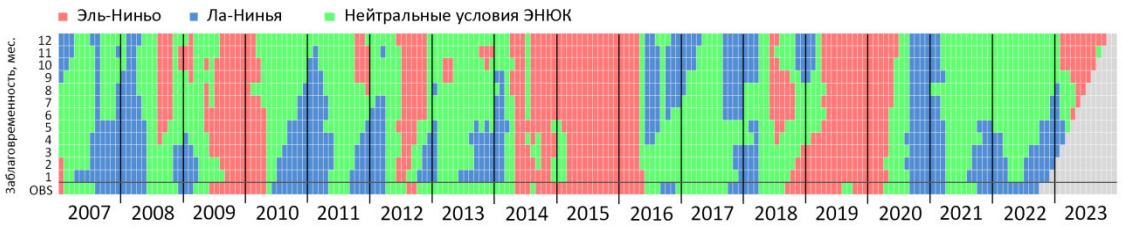


Лаборатория крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы и изменений климата,
Институт природно-технических систем, г. Севастополь E-mail: andrey-ls2015@yandex.ru

На следующей иллюстрации приведены результаты прогноза ЭНЮК, опубликованные во второй половине ноября 2022 г. По результатам, приведенным на сайте Колумбийского университета (iri.columbia.edu, обращение 03.12.2022) 18 динамических и статистических моделей показывают нейтральную фазу ЭНЮК, а только 7 моделей превысили порог 0.5°C, однако в среднем модели показывают нейтральную фазу. По результатам центра климатических прогнозов США (cpc.ncep.noaa.gov, обращение 03.12.2022) в ноябре только 1 из 6 моделей прогнозирует начало Эль-Ниньо. Модель ИПТС показывает завершение Ла-Нинья в феврале 2023 года, нейтральную фазу ЭНЮК марте и апреле, а с мая 2023 года с вероятностью 83% – начало развития Эль-Ниньо.



Воспроизводимость Эль-Ниньо и Ла-Нинья моделью ИПТС с заблаговременностью прогноза до 12 месяцев в сравнении с данными наблюдений (OBS):



Лаборатория крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы и изменений климата,
Институт природно-технических систем, г. Севастополь E-mail: andrey-ls2015@yandex.ru

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Азаренко Е.И. 104

Алатарцева О.С. 78

Антоненков Д.А. 123

Антонович В.В. 46, 61

Антохин П.Н. 46, 61

Антохина О.Ю. 46, 61

Аршинов М.Ю. 46, 61

Аршинова В.Г. 46, 61

Асфандиярова Л.Р. 87

Белан Б.Д. 46, 61

Белан С.Б. 46, 61

Брюховецкий А.А. 133

Гайский В.А. 40

Гайский П.В. 70

Греков А.Н 112

Губарев А.В. 615

Гулин А.С. 93

Давыдов Д.К. 46, 61

Дологлонян А.В. 98

Дыкман А.О. 93

Ивлев Г.А. 46, 61

Ильин В.М. 87

Казанкова И.И. 31

Казанцев С.В. 31

Клименко А.Г. 98

Козлов А.В. 46, 61

Лубков А.С. 143

Маврин А.С. 112

Максютов Ш.Ш. 46, 61

Матвеенко В.Т. 98

Мачида Т. 46, 61

Моисеев Д.В. 133

Осадчая Л.И. 104

Пелюшенко С.С. 112

Пестунов Д.А. 46, 61

Пташник И.В. 46, 61

Полонский А.Б. 6

Рассказчикова Т.М. 46, 61

Савкин Д.Е. 46, 61

Сагадатова Р.Р. 78

Сасакава 46, 61

Симоненков Д.В. 46, 61

Скатков А.В. 133

Скляднева Т.К. 46, 61

Стельмах Л.В. 78

Степанова О.А. 70

Сухонос П.А. 15

Толмачев Г.Н. 46, 61

Торбинский А.В. 6

Тренкеншу Р.П. 93

Федотов А.Б. 25

Фофонов А.В. 46, 61

Хакимова Г.В. 87

Шишкин Ю.Е. 112

Шоларь С.А. 70

Щодро А.Е. 123

Системы контроля окружающей среды
Выпуск 4 (50)

Monitoring systems of environment
Issue 4 (50)

Адрес редакции:
Институт природно-технических систем (ИПТС)
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: skos.sevastopol@inbox.ru
Тел.: +7 (8692) 54-44-10
http://www.msoe.ru

Технические редакторы: Н.И. Терентьева, С.В. Малахатко

Подписано к печати 23.12.2022
Выход в свет 28.12.2022
Заказ 64. 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