

Минеральный состав поверхностных пород и многообразие микропланктона пресных водоёмов в рекреационной зоне Севастополя

Козинцев А. Ф.¹, Бобко Н. И.¹, Лишаев В. Н.¹, Кузнецов А. В.^{1,2}, Аннинский Б. Е.¹

¹ Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН
Севастополь, Россия

² Севастопольский государственный университет
Севастополь, Россия
kuznet61@gmail.com

В ходе экологического мониторинга пресноводных водоёмов в пригородах Севастополя с 2023 по 2024 год, включая пруд на Тороповой даче, озеро возле горы Гасфорта, а также Инкерманский и Кадыковский карьеры, были собраны данные о гидрохимических характеристиках этих водоёмов. Исследование показало значительное влияние элементного и минерального состава поверхностных пород на разнообразие пресноводного микропланктона. В Кадыковском карьере обнаружено повышенное содержание алюминия (до 2,8 %), марганца (до 0,6 %), серы (0,4 %) и цинка (до 0,1 %), что коррелирует с низким биоразнообразием (13 морфотипов) и доминированием динофитовой водоросли *Ceratium hirundinella*. Увеличенная концентрация нитратов (до 20 мг/л) в этом водоёме, вероятно, связана с разовым антропогенным воздействием. В то же время, в водоёмах с более сбалансированным химическим составом (пруд на Тороповой даче, Инкерманский карьер) отмечено значительное разнообразие микропланктона (до 48 морфотипов). Кислотность воды в исследованных водоёмах была близка к нейтральной ($\text{pH}=7,1\pm 1,2$), а температура воды колебалась в зависимости от сезона от 8 до 22 °С. Самая пресная вода оказалась в озере Гасфорта (198 ppm), в то время как наибольшая солёность была зафиксирована в Кадыковском карьере (381-504 ppm). Отмечены временные отличия в концентрациях веществ в исследуемых водоёмах, такие как пиковая концентрация нитратов в Кадыковском карьере и высокое содержание фосфатов и силикатов в пруду на Тороповой даче. Исследование микропланктона показало, что в Кадыковском карьере доминирует динофитовая водоросль *Ceratium hirundinella*, что может указывать на необычное экологическое состояние водоёма. В других водоёмах, таких как пруд на Тороповой даче и Инкерманский карьер, отмечено более высокое биоразнообразие микропланктона, что подтверждает важность сбалансированного химического состава воды для поддержания экосистемы. Водоёмы с более низким содержанием токсичных элементов, таких как алюминий, марганец, сера и цинк, показали более высокое биоразнообразие, что подчеркивает необходимость мониторинга загрязнения для сохранения экосистем. Результаты исследования подчеркивают важность интеграции геохимических и гидробиологических данных для эффективного управления водными ресурсами в рекреационной зоне Севастополя. Данные о минеральном составе поверхностных пород и биоразнообразии микропланктона могут быть использованы для разработки стратегий по предотвращению деградации пресноводных экосистем и обеспечению их устойчивости.

Ключевые слова: минералы, элементный анализ, гидрохимия, последовательная фильтрация, микроскопия, пресноводный микропланктон, биоразнообразие, устойчивость биогеоценозов.

ВВЕДЕНИЕ

Пресноводные экосистемы играют ключевую роль в поддержании биоразнообразия и обеспечении определённого качества водоёмов, позволяющего гарантировать сохранение биоты с одной стороны и возможность рационального водопользования – с другой. Однако их устойчивость во многом зависит от гидрохимических параметров, которые, в свою очередь, формируются под влиянием минерального состава поверхностных пород (Ланцова, 2008; Шабанов, Маркин, 2014; Янин и др., 2016; Reid et al., 2018). В условиях антропогенного воздействия изучение взаимосвязи между геохимической средой и сообществами организмов приобретает особую значимость (Голованов и др., 2009). Это особенно актуально для регионов с интенсивной хозяйственной деятельностью, где пресноводные водоёмы подвержены влиянию как природных, так и антропогенных факторов (Лисовский и др., 2011; Сигора и др., 2020).

Исследования демонстрируют, что минеральный состав пород оказывает влияние на гидрохимические свойства водоёмов, обуславливая кислотность, солёность и концентрацию биогенных элементов (Ghani et al., 2022). Важное значение имеет биодоступность минералов (Gensemer, Playle, 1999; van Leeuwen et al., 2005). Высокие концентрации ионов металлов могут оказывать токсический эффект на гидробионтов (Rand, Petrocelli, 1985; Воробьева и др., 2020) и подвергать риску здоровье человека (Das et al., 2023). Микропланктон, как ключевой компонент водных экосистем, может служить индикатором экологического состояния водоёмов (Дрозденко и др., 2018). Несмотря на значительное количество работ, посвящённых влиянию геохимических факторов на водные экосистемы, вопросы, связанные с корреляцией минерального состава пород и биоразнообразием микропланктона, остаются недостаточно изученными, особенно в контексте региональных особенностей Крымского полуострова.

Пригороды Севастополя характеризуются уникальными гидрогеологическими условиями, включая наличие карстовых источников и искусственных озёр (Сигора и др., 2020). Однако антропогенное воздействие, такое как промышленные стоки и добыча полезных ископаемых, может приводить к изменению гидрохимических свойств водоёмов и, как следствие, к деградации экосистем. В частности, Кадыковский карьер (рис. 1а) демонстрирует признаки экологического неблагополучия (Парфенова и др., 2016; Болтачев и др., 2017). Настоящие исследования были проведены с целью поиска возможной связи между минеральным составом поверхностных пород и биоразнообразием микропланктона в пресноводных водоёмах пригородов Севастополя.



Рис. 1. Экспедиционные работы в Кадыковском карьере
Общий вид на котловину Кадыковского карьера (а), сбор минералов (б), сбор планктона (в).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили с 2023 по 2024 год на четырёх станциях: Торопова дача (N44.511, E33.682), гора Гасфорта (N44.531, E33.679), Инкерманский (N44.605, E33.610) и Кадыковский (N44.516, E33.565) карьеры (рис. 2). Пробы отбирали, следуя ГОСТ 31861-2012 (вода) и ГОСТ 13047-2014 (минералы). Для получения базовых данных сбор вели с верхних слоёв пород и с поверхностного слоя воды, учитывая ограниченный бюджет.

Подготовка и исследование минералов. Сколы горной породы на берегу водоёмов (рис. 1б) очищали, промывали дистиллированной водой и высушивали при комнатной температуре (рис. 3). Минералы дробили до мелкой щебёнки с помощью перфоратора. Полученную щебёнку перетирали вручную: сначала в керамической ступке до состояния песка, затем в агатовой ступке до консистенции пыли. Электронную микроскопию (SEM) выполняли с помощью сканирующего электронного микроскопа SU3500, Hitachi. Энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию (EDX) химических элементов проводили с помощью приставки Ultim Max 65, Oxford Instruments (рис. 4). Элемент железо исключали из дальнейшего анализа.

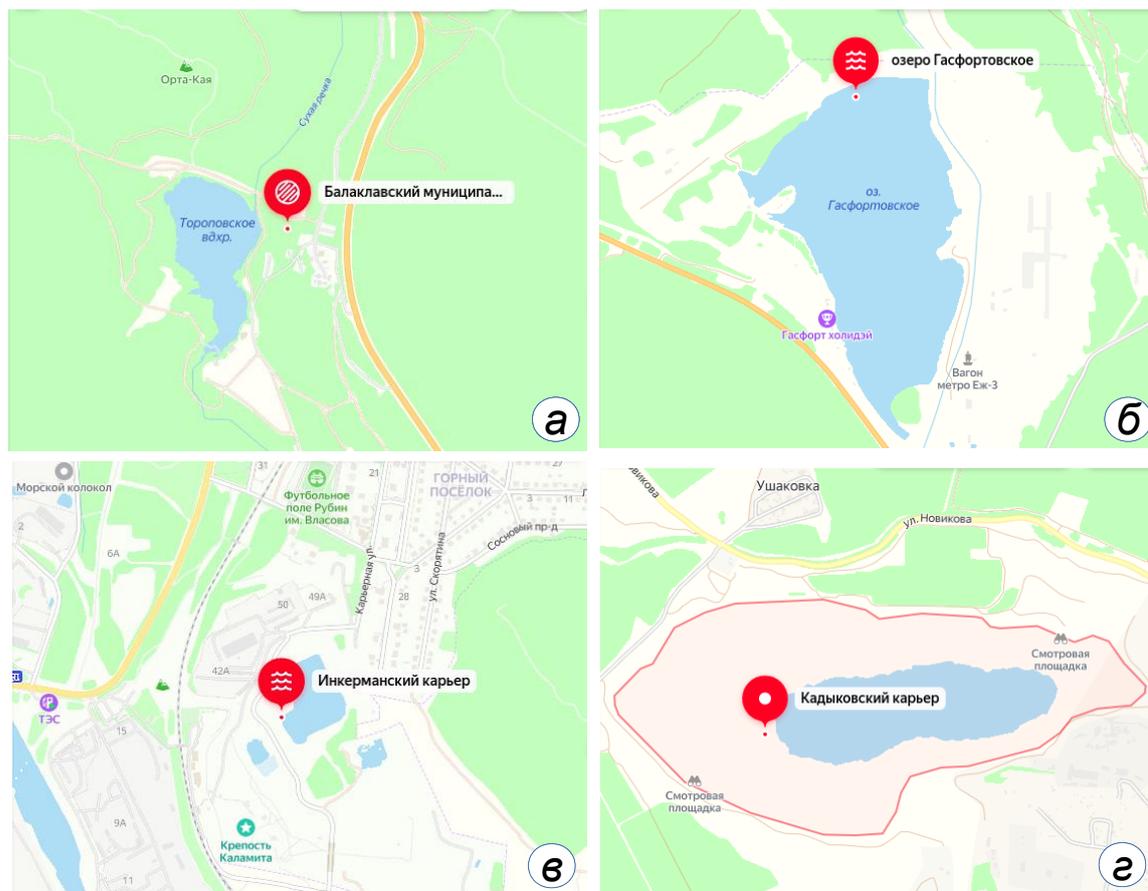


Рис. 2. Места расположения экспериментальных станций
Торопова дача (N44.511, E33.682) (а), гора Гасфорта (N44.531, E33.679) (б), Инкерманский карьер (N44.605, E33.610) (в) и Кадыковский карьер (N44.516, E33.565) (г).

Химический анализ воды. В экспедиционных условиях оценка кислотности проводилась с использованием портативного рН-метра. Температура и солёность воды измерялись с применением TDS-метра модели ИК-01. Поскольку солемер производит измерения в единицах ppm (particles per million – частицы на миллион), полученные значения преобразовывали в концентрации на основании калибровочной кривой. Концентрации биогенных элементов в воде измеряли по стандартизованным методикам в лабораторных условиях (Методы гидрохимических..., 1988).

Изучение биообразцов. Воду и планктон отбирали возле берега с поверхности и затем разливали в пластиковые бутылки или разделяли на размерные фракции с помощью устройства последовательной фильтрации Viber-2 с сетками 2 мм, 300, 150, 84 мкм и волоконным фильтром 5 мкм (рис. 1в). Микропланктон префиксировали 2,5 % глутаровым альдегидом (ГА). Таксономическое выявление морфотипов (Уфимцева, Кузнецов, 2022) планктонных организмов размером от 5 до 84 мкм проводили под микроскопом МС-4 с видеоокуляром Эврика 1.3 МР, Микромед при увеличении до 50 раз. Биологические образцы фотографировали в микроскопе Eclipse Ts2R, Nikon с DIC-оптикой при увеличении 100 крат. Для электронной микроскопии префиксированные пробы ещё раз промывали водой, осаждали на нейлонный фильтр с размером пор 0,2 мкм, а затем фильтр помещали на 15 мин на поверхность раствора 2,5 % ГА для дополнительной фиксации и закрепления биообъектов на подложке. После этого пробы промывали трижды по 10 мин, помещая их на поверхность сначала профильтрованной водопроводной воды, затем дважды на поверхность дистиллированной воды. После высыхания проб в течение суток, образцы досушивали при

критической точке, покрывали сплавом золота с палладием в режиме диффузного напыления на установке EM ACE200, Leica, и просматривали в SEM.

Математический анализ. Статистический анализ данных и их визуализацию осуществляли в среде R. Результаты приведены в виде среднего со стандартной ошибкой $X_{\text{ср}} \pm \Delta_{\text{ст}}$. Для оценки биоразнообразия использовали показатель обилия сложных сообществ – индекс богатства морфотипов (Morphotype richness, M), который является простой и понятной характеристикой экосистемы.



Рис. 3. Фотографии образцов минералов

Первый ряд – красный мраморовидный известняк, серый известняк и белый мраморовидный известняк из Кадыковского карьера, второй ряд – известняки из Инкерманского карьера.

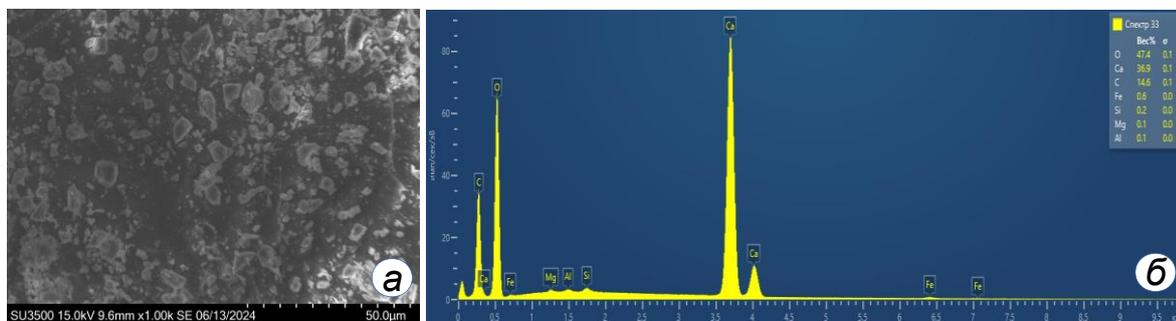


Рис. 4. Пример электронной микрофотографии порошка кальцита из Кадыковского карьера (а) и EDX-спектра (б)

Снимок: сканирующий электронный микроскоп SU3500, Hitachi с приставкой Ultim Max 65, Oxford Instruments.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание химических элементов в минералах. В этом разделе представлены данные по элементному составу горных пород на станциях, кроме Тороповой дачи, где горные породы скрыты под слоем почвы. Результаты сбора минералов в окрестностях Севастополя систематизированы в Таб. 1 в порядке их поступления в лабораторию.

В найденных минералах, типичных для Крымского полуострова (Тищенко, Касаткин, 2020), обнаружено 20 элементов периодической таблицы Д. И. Менделеева. Приведём

первичную оценку их содержания в горных породах возле разных водоёмов. Во всех известняках отмечено высокое содержание кальция (Ca) – до 62 %, что соответствует их природному составу. В сером известняке Кадыковского карьера (проба № 2) обнаружено повышенное содержание кремния (Si) – до 5,7 %, что согласуется с результатами анализа воды из карьеров. Чёрное включение в красном мраморовидном известняке (проба № 8) может быть органическим отложением с повышенным содержанием углерода (C) – 7,32–10,30 % и кислорода (O) – 36,04–44,82 %. Зелёный минерал, найденный в окрестностях горы Гасфорта (проба № 10), обогащён кремнием (Si) – 3,5–25,4 % и кислородом (O) – 38,54–44,1 %, что соответствует оксиду кремния. Металлоподобная проба № 11, найденная возле горы Гасфорта, оказалась сурьмой (Sb) с содержанием до 93,6 %, что требует дополнительной проверки на возможные ошибки.

Таблица 1

Минералы, собранные на экспериментальных станциях

№	Минерал	Станция
1	красный мраморовидный известняк	Кадыковский карьер
2	серый известняк	Кадыковский карьер
3	белый мраморовидный известняк с жилой кальцита	Кадыковский карьер
4	жила кальцита на белом мраморовидном известняке	Кадыковский карьер
5	известняк, образец 1	Инкерманский карьер
6	известняк, образец 2	Инкерманский карьер
7	белый мраморовидный известняк	Кадыковский карьер
8	чёрное включение в красном мраморовидном известняке	Кадыковский карьер
9	кристаллы кальцита	Кадыковский карьер
10	зелёный минерал	гора Гасфорта
11	металлоподобный минерал	гора Гасфорта

Статистический анализ основных химических элементов по 10 измерениям каждого образца минерала выявил следующее. Содержание кальция (Ca) и кислорода (O) составляет более 40 % каждого во всех пробах, что более чем в 4 раза превышает присутствие других элементов, как углерод (C) и кремний (Si). Количество элемента Ca значительно варьирует в пробах известняка из Инкерманского карьера в отличие от других экспериментальных станций (рис. 5).

Помимо основных элементов, как O, Ca, C, Si и Fe (до 9,4 %), в пробах обнаружены металлы Al, Mn, Cr, Ti, K, Mg и Na, неметаллы S и Cl, следы элементов Mo, Br, Zn и P. В одном образце превалировал полуметалл сурьма (Sb). Содержание алюминия – Al достигало 2,8 %, S – 0,4 % в сером известняке, а количество K – 1,1 % в породах Кадыковского карьера. Количество Mg варьировало в пределах 0,1–0,4 % в большинстве пород. Химический элемент Cl найден в известняках Инкерманского Карьера (до 0,6 %), Na встречался в известняках Кадыковского и Инкерманского карьеров (0,1 %), а также был найден в зелёном минерале горы Гасфорта (0,2 %). Включения Mo (0,1 %) зафиксированы в известняках Инкерманского карьера, следовые количества Br (0,1 %) и следы Zn (до 0,1 %) отмечены в белом мраморовидном известняке Кадыковского карьера. В чёрном включении красного мраморовидного известняка из Кадыковского карьера обнаружен элемент P (0,3 %). Химический элемент Mn найден в чёрном включении красного мраморовидного известняка из Кадыковского карьера (до 0,6 %) и в зелёном минерале горы Гасфорта (до 11,3 %). Также в

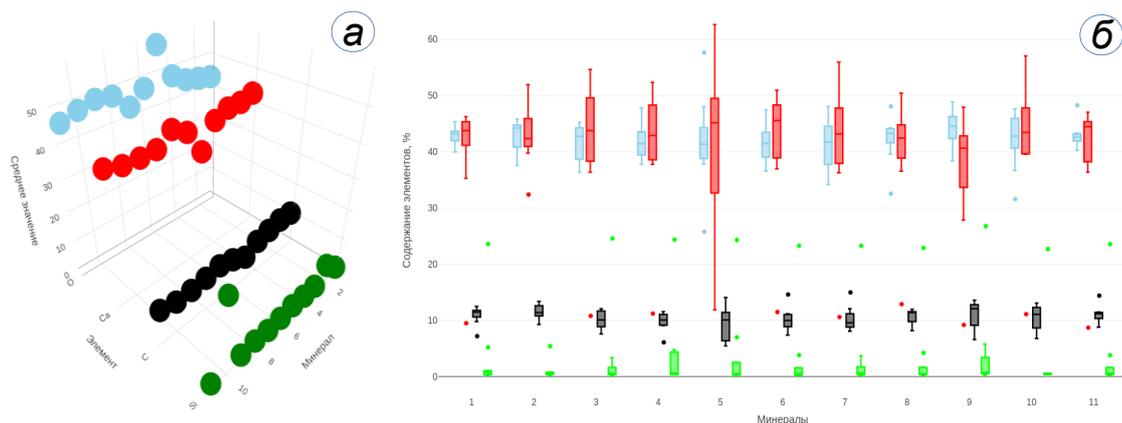


Рис. 5. Содержание основных элементов в пробах минералов с экспериментальных станций

На 3D-диаграмме усреднённых значений (а) и на рисунке б химические элементы О и Са расположены сверху по шкале, а С и Si – внизу, что соответствует общей тенденции уменьшения концентрации элементов в ряду $O > Ca > C > Si$ во всех минералах. Элемент О – голубой, Са – красный, С – чёрный, Si – зелёный. Нумерация проб минералов соответствует Таб. 1. Содержание элементов выражено в % (б).

зелёном минерале горы Гасфорта присутствуют металлы Cr (до 0,6 %) и Ti (до 0,2 %). Помимо этого, в металлоподобном минерале горы Гасфорта находится до 0,2 % щёлочноземельного металла Sr. Примечательно, что содержание элемента Sb в металлоподобном минерале, найденном возле горы Гасфорта с помощью металлоискателя, достигало 93,6 %.

Гидрохимические показатели. Кислотность воды в исследованных пресноводных водоёмах была близка к нейтральной ($pH=7,1\pm 1,2$). Температура воды зависела от сезона года и колебалась от 8 до 22 °С. Самая пресная вода оказалась в озере Гасфорта (198 ppm), несколько большая солёность зафиксирована в пруду на Тороповой даче (278–298 ppm), ещё более солёная вода – в Инкерманском карьере (315 ppm) и, наконец, наибольший показатель отмечен в Кадыковском карьере (381–504 ppm), максимум которого соответствует ~500 мг/л.

Выявлены временные отличия в концентрациях веществ в исследуемых водоёмах. Отмечена пиковая концентрация нитрата NO_3^- (20000 мкг/л, N) в Кадыковском карьере 6 июня 2024 г. В пруду на Тороповой даче в летний период обнаружено высокое содержание фосфата $H_2PO_4^-$ и силиката в виде ортокремниевой кислоты (H_4SiO_4) – 3262 ± 3240 мкг/л, P и 4628 ± 1873 мкг/л, Si, соответственно. Присутствие растворённого кремния варьировало в разных водоёмах. Так, в пруду Тороповой дачи оно превышало аналогичный показатель в озере Гасфорта (996 ± 684 мкг/л, Si) в 4,6 раза, а в Кадыковском карьере (1892 ± 322 мкг/л, Si) его содержание было больше в 14,5 раз, чем в Инкерманском карьере ($130\pm 80,5$ мкг/л, Si). Максимальная разница в 35,6 раза выявлена между Тороповой дачей и Инкерманом.

Господствующая микроводоросль Кадыковского карьера. В Кадыковском карьере доминирует динофитовая водоросль *Ceratium hirundinella* (O.F. Müller) Dujardin, 1841 о чём свидетельствует чистота микроскопических препаратов (рис. 6). Поверхность организма покрыта панцирем, состоящим из эпитеки и гипотеки, разделённых пояском. На передней части эпитеки имеется единственный апикальный вырост с открытым зубчатым концом. На гипотекке выступают два выроста, заканчивающихся острыми закрытыми концами. Также можно видеть продольные борозды, разделяющие поверхность организма на части. Панцирь представляет собой налегающие друг на друга пластины, которые пронизаны порами диаметром 0,5 мкм в регулярном порядке, напоминающем винтовые линии (рис. 7). Следует отметить, что *C. hirundinella* выявлена и в других водоёмах, но лишь в Кадыковском карьере этот вид является массовым и встречается круглый год с пиком размножения с марта по июль.

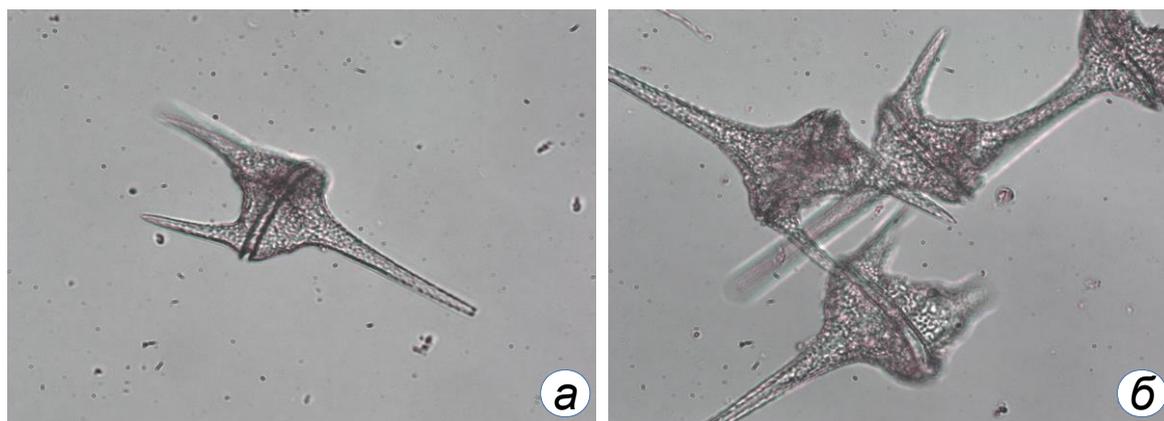


Рис. 6. Световая микроскопия *Ceratium hirundinella*
Увеличение 100 раз, микроскоп Eclipse Ts2R, Nikon.

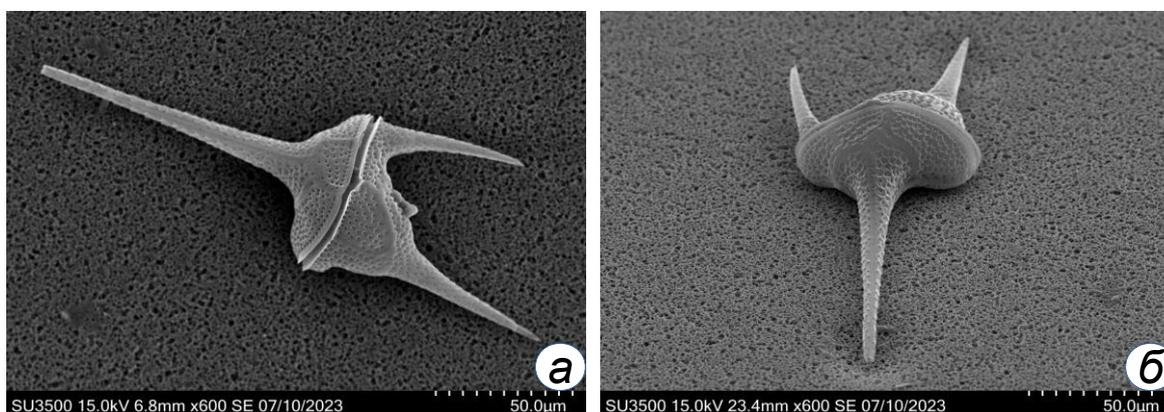


Рис. 7. Электронные фотографии *Ceratium hirundinella*
Напыление сплавом Au и Pd, сканирующий электронный микроскоп SU3500, Hitachi.

Богатство жизни и элементный состав минералов вблизи озёр. В поверхностном слое воды исследованных пресных водоёмов обитают разные одноклеточные и многоклеточные водоросли, коловратки, мелкие членистоногие и другие микроскопические животные. Наблюдение за составом планктонных организмов в водоёмах в течение года и подсчёт таксономических единиц выявили в Кадыковском озере 13 отдельных морфотипов, из них 5 в последней размерной фракции № 4 (5–84 мкм), тогда как в Тороповом пруду обнаружено в сумме 48 морфотипов, из них 22 во фракции № 4. Представители Кадыковского карьера из фракции 5–84 мкм встречаются и на Тороповой даче (рис. 8а). Разовая весенняя проба из Инкерманского карьера содержала 15 морфотипов, из них 10 в последней фракции, а зимняя проба из озера Гасфорта – 14 морфотипов, где 3 из них в последней мелкой фракции 5–84 мкм. В зависимости от сезона в пруду на Тороповой даче доминировал тот или иной вид фитопланктона или зоопланктона. Зимой зоопланктон превалировал над фитопланктоном. Динофитовая водоросль *C. hirundinella* не найдена в озере Гасфорта, но изобиловала в Кадыковском и Инкерманском карьерах с всплеском размножения в весенне-летний период (рис. 6, 7).

Содержание элементов в минералах, отобранных на четырёх экспериментальных станциях, сравнили с концентрацией минеральных солей в воде, а также с пробами микропланктона из этих источников. Оказалось, что Инкерманский и Кадыковский карьеры – это два независимых кластера в координатах: содержание химических элементов – количество

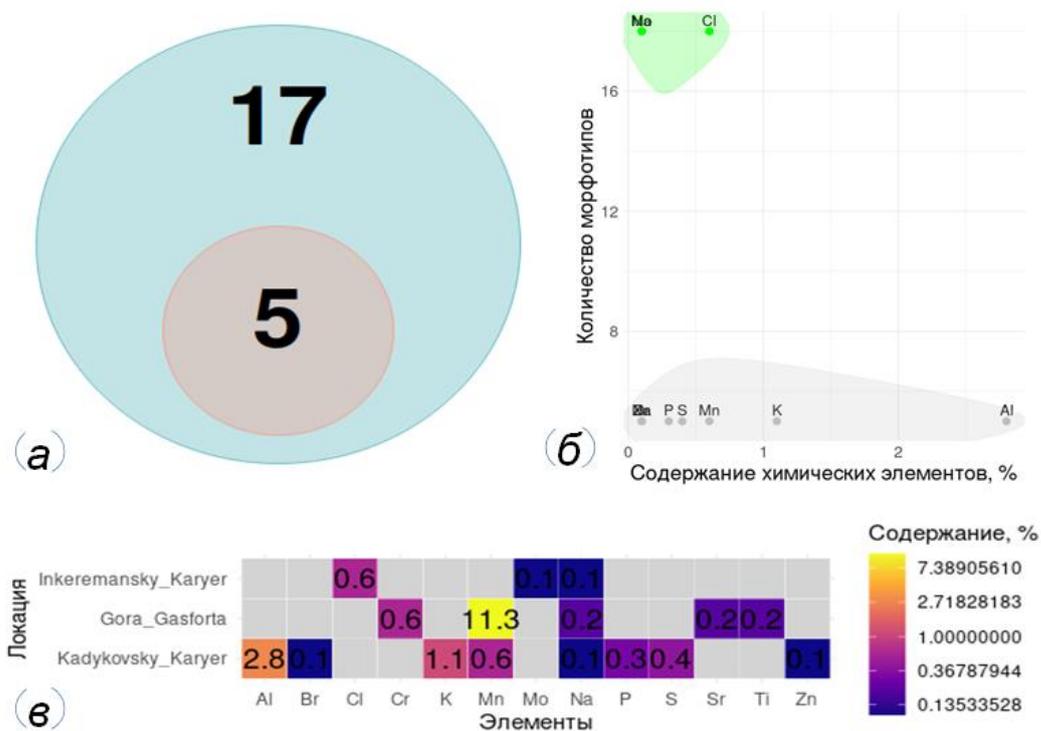


Рис. 8. Обратное отношение между биоразнообразием и содержанием определённых элементов по локациям

Диаграмма Венна для микропланктона размерной фракции 5–84 мкм из пруда на Тороповой даче (голубой) и озера в Кадыковском карьере (серый) с указанием числа морфотипов (а), положение двух кластеров, соответствующих Инкерманскому (зелёный) и Кадыковскому (серый) карьерам, на плоскости: содержание химических элементов – число морфотипов (б), тепловая карта содержания элементов, где максимальные значения Al, Br, Cl, Cr, K, Mn, Mo, Na, P, S, Sr, Ti и Zn выражены в долевых процентах (%) и использована логарифмическая шкала (в).

морфотипов (рис. 8б). Примечательно, что богатство, выявленных на экспериментальных станциях морфотипов находится в обратной зависимости от содержания минорных химических элементов в минералах с этих станций. Особенно яркая картина наблюдается в Кадыковском карьере, где низкое биоразнообразие сочетается с присутствием пула химических элементов, как Al, Br, K, Mn, Na, P, S и Zn (рис. 8в).

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты нашего исследования свидетельствуют, что такие показатели, как кислотность и солёность, для всех изученных водоёмов находятся в пределах нормы по рекомендациям ВОЗ для питьевой воды: $pH \approx 7,0$ и концентрация солей < 500 мг/л, соответственно (Руководство по обеспечению..., 2017; Стокгольмская конвенция... 2021). Для оценки экологического состояния водоёмов более релевантными являются критерии, учитывающие предельно допустимые концентрации (ПДК) для гидробионтов, которые могут отличаться от норм для питьевой воды (Нормы качества..., 2.1.4.1074-01). Чтобы сравнить содержание химических элементов в породах с ПДК в воде, необходимо пересчитать процентное содержание каждого элемента в минерале в его концентрацию в водном растворе, учитывая растворимость этого элемента, а также доступность минерала для воды.

Так, например, содержание алюминия в минералах Кадыковского карьера достигает 2,8%. Потенциальное содержание растворимого алюминия в водоёме при условии полной

растворимости может составить около 2,8 мг/л (при 0,1 г минерала на литр воды), что превышает ПДК для рыбохозяйственных водоёмов (0,04 мг/л) и для питьевой воды (0,2 мг/л). Однако нужно отметить, что это потенциальное превышение ПДК, при условии полной растворимости, что в реальности маловероятно. Растворимость Al в чистой воде крайне низка – он реагирует с водой в присутствии кислорода, образуя оксид алюминия и водород. Оксид алюминия в очень незначительной степени растворяется в воде, образуя гидроксиды алюминия. В природных водах растворимость может варьировать в зависимости от pH воды и присутствия других ионов. Таким образом, растворимость соединений алюминия, содержащихся в минералах, зависит от конкретного минерала и условий среды. Аналогично, высокое содержание марганца в минералах, до 0,6 %, также может превысить ПДК для рыбохозяйственных водоёмов (0,01 мг/л) и для питьевой воды (0,05 мг/л) лишь при условии полной растворимости. Содержание цинка до 0,1 % в минералах, при абсолютных значениях может привести к превышению ПДК для рыбохозяйственных водоёмов (0,01 мг/л), в то время как для питьевой воды ПДК составляет 3 мг/л. Напротив, концентрация хорошо растворимых нитратов в Кадыковском карьере (до 20 мг/л) находится ниже ПДК для рыбохозяйственных водоёмов (40 мг/л) и питьевой воды (50 мг/л).

Высокое содержание кальция в пробах указывает на известняковые образования, которые в некоторых случаях могут быть малопригодными для поддержания биоразнообразия, особенно для видов, чувствительных к высокой жёсткости воды. Обнаруженное незначительное повышение количества нитратов и растворённого кремния в Кадыковском карьере теоретически может привести к негативным последствиям для водной экосистемы, включая снижение видового богатства. Содержание нитратов часто связано с антропогенным воздействием, таким как сельскохозяйственные стоки или сбросы промышленных отходов (Исмагилов, 2012). В пруду на Тороповой даче отмечено повышенное содержание фосфатов и силикатов, что наоборот благоприятствует поддержанию разнообразия водной флоры, так как эти элементы являются ключевыми биогенными веществами для роста фитопланктона (Полякова, Полякова, 2017).

Анализ минералов выявил присутствие элементов, которые способны отравляюще действовать на гидробионтов (Rand, Petroselli, 1985; Фелленберг, 1997; Дмитриева и др., 2002; Новиков и др., 2022). В частности, в горном минерале возле горы Гасфорта обнаружено высокое содержание сурьмы (Sb) – до 93,6 %. Такое значение требует дополнительной проверки, так как оно может указывать на потенциальное загрязнение прилегающего озера, однако для подтверждения этого необходимы дальнейшие исследования. Сурьма является токсичным элементом, который даже в низких концентрациях может вызывать нарушения метаболизма (He et al., 2019; Filella et al., 2002). Также здесь велико содержание Mn (11,3 %) по сравнению с другими локациями, его высокие концентрации могут быть ядовитыми (Воробьева и др., 2020). В Кадыковском карьере выявлены 8 химических элементов (Al, Br, K, Mn, Na, P, S и Zn), повышенные концентрации которых, предположительно, могут быть отравляющими (Волков, 1975; Линник, 2006). Напротив, в Инкерманском карьере (озеро Святого Климента) и в пруду на Тороповой даче не обнаружено каких-либо вредных веществ, что объясняет высокое биоразнообразие в этих водоёмах.

Согласно литературным данным, алюминий (Al) в повышенных концентрациях может оказывать токсическое действие на водные организмы, особенно на рыб и беспозвоночных (Baker, McCready, 1991; Виноградов, 1992; Gensemer, Playle, 1999; Воробьева и др., 2020). Предполагается, что ионы алюминия могут нарушать осморегуляцию клеток, что приводит к повреждению клеточной структуры и нарушению метаболизма (Шугалей, 2012; Скупневский, Иванов, 2023). Однако для подтверждения этих механизмов в условиях исследуемых водоёмов необходимы дополнительные эксперименты. Алюминий также может связываться с фосфатами (Тихонов, 1971), ограничивая доступ живых объектов к этому источнику. Калий (K), как правило, не считается ядовитым в нормальных концентрациях и является важным элементом, необходимым для жизнедеятельности клеток (Гинецинский, 1963; Андреев, Гулиев, 2008). Однако его избыток может нарушать баланс других элементов и приводить к осмотическому стрессу (Виноградов, 2000; Хлебович, 2015аб). Хотя марганец (Mn) является

важным микроэлементом, его избыточное потребление может влиять на состояние клеток и тканей (Dobson et al., 2004; Мартынова, 2010, 2012; Peres et al., 2016; Каменец, 2016, 2017). Элемент сера (S) может быть вреден для обитателей водоёмов в нескольких аспектах (Holmer, Storkholm, 2001). При разложении органических веществ в анаэробных условиях соли серы могут преобразовываться в сероводород (H_2S) и оказывать негативное влияние на гидробионтов (Фрог и др., 2012). Повышенные концентрации серы могут приводить к интенсификации процессов, связанных с разложением органических материалов, что может утилизировать растворённый кислород. Это, в свою очередь, приводит к гипоксии (Солдатов и др., 2022). Гибель водорослей и их разложение также снижает концентрацию кислорода, ухудшая условия для обитателей водоёма (Пронина и др., 2016). Наконец, цинк (Zn) в умеренных количествах необходим для многих биохимических процессов, однако высокие концентрации этого микроэлемента могут вызывать подавление роста, нарушения метаболизма и даже гибель организмов (Skidmore, 1964; Zaranyica, 1997; Добровольский, 1980; Велиханов, 1988; Muysen et al., 2005). Таким образом, высокое содержание этих элементов, особенно алюминия, серы и цинка, может отравлять экосистему, что, возможно, частично объясняет наблюдаемое низкое биоразнообразие в Кадыковском карьере по сравнению с другими водоёмами, где содержание этих элементов ниже. Однако для установления точных причинно-следственных связей необходимы дополнительные исследования, учитывающие другие возможные факторы.

Зафиксированная 6 июня 2024 г. повышенная концентрация нитратов в Кадыковском озере (20 мг/л) может быть связана с антропогенным воздействием, таким как разовый сброс сточных вод или сельскохозяйственных удобрений. Однако их исчезновение через неделю может также объясняться естественными процессами, такими как поглощение нитратов фитопланктоном или их преобразование в другие формы азота. Примечательно, что в этот же период наблюдалось необычайно большое количество микроводоросли *C. hirundinella*, что может свидетельствовать о временном изменении экологических условий в водоёме. Следует отметить, что данный организм встречается в разных регионах мира в пресных и солоноватых водоёмах, таких как озера, реки и эстуарии (Müller, 1773; Graham et al., 1944; Sournia, 1968). Этот вид играет важную роль в экосистемах, так как является частью фитоценозов и важным элементом водной сети питания (Charman et al., 1982; Матвиенко, 1977). Микроводоросль *C. hirundinella* является индикатором начальной стадии эвтрофикации. При умеренной доступности фосфора и азота, *C. hirundinella* может демонстрировать повышенную численность. Однако при интенсивной эвтрофикации, вид *C. hirundinella* может быть вытеснен другими видами фитопланктона, которые более эффективно используют избыток питательных веществ и/или более толерантны к недостатку кислорода, часто сопутствующим сильному загрязнению органикой. Для надёжной характеристики качества воды с использованием *C. hirundinella* необходим комплексный анализ, включающий оценку других физико-химических и биологических показателей (Nwankwegu et al., 2023).

Можно добавить, что «Чаша Любви» или «озеро Сердце» находится на 14 м ниже уровня моря и на удалении 2,5 км от береговой линии, что позволяет морской воде просачиваться через известняковые породы в воды Кадыковского карьера. Также, озеро питается подземными источниками пресной грунтовой воды, которые поддерживают водный баланс. За осенне-зимний сезон чаша Кадыковского карьера пополняется дождевой водой, что ведёт к повышению её уровня на 1–2 м, а затем, соответственно, испаряется в весенне-летний сезон. Однако такое спорадическое, а не регулярное наполнение водоёма приводит к трудностям адаптации водных организмов к случайным условиям, что может быть одной из причин отсутствия видового богатства Кадыковского карьера. Подобная причина низкого биоразнообразия высказывалась для эстуария Чёрной речки, где распреснение имеет нерегулярный характер и, вероятно, приводит к уменьшению разнообразия гидробионтов по сравнению с прилегающими районами (Уфимцева, Кузнецов, 2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из оценки пригодности водоёмов для обитания живых существ на основе анализа химического состава проб минералов и воды, а также данных о биоразнообразии планктонных организмов можно констатировать следующее. Качество воды во всех исследованных водоёмах и локальная экологическая обстановка может быть охарактеризована, как практически здоровая. Вода из Кадыковского карьера отличается наибольшей чистотой и пригодна для питья, однако устойчивость биогеоценоза там, возможно, меньше, чем в других водоёмах из-за пониженного биологического разнообразия, что требует охранных мероприятий. Однозначной связи между составом скальных пород и свойствами воды не установлено в силу специфической растворимости химических элементов. В Кадыковском карьере, где выявлено повышенное содержание алюминия (до 2,8 %), серы (0,4 %), марганца (0,6 %) и цинка (0,1 %), в размерной фракции № 4 (5–84 мкм) обнаружено лишь 5 таксономических морфотипов, включая *C. hirundinella*, тогда как в озёрах на Тороповой даче и в Инкермане разнообразие морфотипов планктона в этой же фракции было гораздо шире и составило 22 и 10 единиц, соответственно. В целом, Кадыковский карьер выделяется низким биоразнообразием (всего 13 морфотипов) по сравнению с Тороповой дачей (до 48 морфотипов). Доминирование динофитовой водоросли *Ceratium hirundinella* в этом водоёме служит показателем необычного экологического состояния. В отличие от этого, в пруду на Тороповой даче, в Инкерманском карьере и в озере Гасфорта сбалансированный химический состав способствует поддержанию богатых по разнообразию сообществ.

Исследование предоставляет основу для разработки региональных программ по предотвращению деградации пресноводных водоёмов. В частности, выявленные источники загрязнения, такие как нитраты и токсичные элементы, требуют мониторинга и регулирования. Особое внимание необходимо уделить Кадыковскому карьере. Следует учитывать, что наши выводы носят предварительный характер и требуют дальнейшей проверки. Одним из ограничений данного исследования является относительно небольшая выборка. Для повышения репрезентативности результатов желательно расширение множества данных, включая большее количество водоёмов и отобранных проб.

Для глубокого понимания динамики загрязнения и устойчивости экосистем к токсичным элементам требуются долгосрочные исследования. Целесообразно расширить анализ на другие размерные фракции планктона, а также включить молекулярные методы для изучения механизмов токсичности и адаптации гидробионтов к изменяющимся условиям среды. В частности, для полного понимания функционирования биогеоценоза необходимо исследование микробиомов, так как микроорганизмы играют ключевую роль в трансформации минералов, а для этого важно использование методов анализа экологической ДНК. Эти шаги позволят уточнить механизмы влияния минерального состава на биоразнообразие и разработать более эффективные стратегии охраны и управления водными ресурсами региона.

Благодарности. Авторы искренне признательны Рябушко Л. И., за помощь в идентификации динофитовых водорослей, Капранову С. В., Климовой Т. Н., Алёмову С. В., Алёмовой Т. Е. и Трощенко О. А. за обсуждение результатов, а также благодарны таким студентам, как Курченко В. М., Тихонов С. Ю., Подкидышева Ю. К., Григорьев М. Н., Хавронюк И. С., Гунькова А. К. и Таран Н. А. за участие в отборе проб.

Список литературы

Андреев В. В., Гулиев Р. А. Обмен натрия и калия у рыб при высокой концентрации ионов в воде // Рыбное хозяйство. Вестник АГТУ. – 2008. – № 3 (44). – С. 43–48.

Болтачев А. Р., Климова Т. Н., Вдович И. В., Бондарева Л. В., Аблязов Э. Р., Рыжилов М. С. Отчёт по Договору № 2017/6 от 22 мая 2017 г. на выполнение научно-исследовательских работ/оказание услуг. – 2017. – С. 1–7.

- Велиханов Э. Э. Токсичность цинка для креветки // Первая Всесоюзная конф. по рыбохозяйственной токсикологии. Тез. докл. Рига, 1988. Ч. 1. С. 60–61.
- Виноградов Г. А. Обмен кальция и натрия у рыб при вариации концентраций ионов алюминия, меди, кадмия, магния и водорода // Информационный бюллетень. Биология внутренних вод. – 1992. – № 91. – С. 60–68.
- Виноградов Г. А. Процессы ионной регуляции у пресноводных рыб и беспозвоночных. – М.: Наука, 2000. – 216 с.
- Волков И. И. Химические элементы в речном стоке и формы их поступления в море (на примере Черноморского бассейна) // Проблемы литологии и геохимии осадочных пород и руд. – М.: Наука, 1975. – С. 85–113.
- Воробьева О. В., Исакова Е. Ф., Заец М. А., Мерзеликин А. Ю., Самойлова Т. А. Токсичность иона алюминия для *Daphnia magna* Straus в зависимости от жесткости природной и искусственной воды // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. – 2020. – Т. 75. – № 4. – С. 273–279.
- Гинецинский А. Г. Физиологические механизмы водно-солевого равновесия. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. – 426 с.
- Голованов А. И., Зимин Ф. М., Сметанин В. И. Рекультивация нарушенных земель / А. И. Голованов (ред.). – М.: Колос, 2009. – 325 с.
- Дмитриева А. Г., Кожанова О. Н., Дронина Н. Л. Физиология растительных организмов и роль металлов. – Москва: Изд-во МГУ, 2002. – 160 с.
- Добровольский В. В. Тяжёлые металлы: загрязнение окружающей среды и глобальная геохимия // Тяжёлые металлы в окружающей среде. – М.: МГУ, 1980. – С. 3–12.
- Дрозденко Т. В. Фитопланктон как индикатор экологического состояния водоема (на примере озера Барское, Псковская область) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология. – 2018. – Т. 18, вып. 2. – С. 225–231.
- Исмагилов Р. Р. Проблема загрязнения водной среды и пути ее решения // Молодой ученый. – 2012. – № 11 (46). – С. 127–129.
- Каменец А. Ф. Влияние ионов марганца (II) на *Scenedesmus quadricauda* // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2017. – № 1. – С. 67–70.
- Каменец А. Ф. Влияние ионов марганца (II) на репродуктивную активность, смертность и трофическую активность *Daphnia magna* // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – № 12. – С. 8–12.
- Ланцова И. В. Геоэкологические аспекты рекреационного водопользования. – Тверь: ООО Издательство «Триада», 2008. – 216 с.
- Линник П. Н. Влияние различных факторов на десорбцию металлов из донных отложений в условиях экспериментального моделирования // Гидробиологический журнал. – 2006. – Т. 42. – № 3. – С. 97–114.
- Лисовский А. А., Новик В. А., Тимченко З. В., Губская У. А. Поверхностные водные объекты Крыма. Управление и использование водных ресурсов: справочник. – Симферополь: КРП Учпедгиз, 2011. – 242 с.
- Мартынова М. В. Марганец в придонной воде и донных отложениях Можайского водохранилища. 1. Сезонные колебания в воде // Экологическая химия. – 2010. – Т. 19. – № 4. – С. 229–235.
- Мартынова М. В. Формы нахождения марганца, их содержание и трансформация в пресноводных отложениях // Экологическая химия. – 2012. – Т. 21. – № 1. – С. 38–52.
- Матвиенко А. М. Отдел пиррофитовые водоросли (Rytophyta) // Жизнь растений. Т. 3. Водоросли. Лишайники / Под ред. М. М. Голлербаха. – М.: Просвещение, 1977. – 487 с. – С. 93–100.
- Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. – М.: ВНИРО, 1988. – 120 с.
- Новиков Д. А., Черных А. В., Хващевская А. А., Максимова А. А., Деркачев А. С., Дульцев Ф. Ф., Ничкова Л. А., Сигора Г. А., Хоменко Т. Ю., Яхин Т. А. Токсичные элементы в природных водах севастопольской городской агломерации: распределение, фон, аномалии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 4. – С. 79–92.
- Нормы качества питьевой воды СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. (ВОЗ, ЕС, USEPA).
- Парфенова И. А., Репецкая А. И., Кладченко Е. С. Концепция рекультивации Кадыковского карьера с организации туристско-рекреационного объекта (Севастополь, Балаклава). – Экосистемы. – 2016. – Вып. 6. – С. 51–65.
- Полякова Т. В., Полякова А. В. Влияние изменчивости биогенной базы на фитопланктон Геленджикской бухты Черного моря // Вопросы современной альгологии. – 2017. – № 1 (13).
- Пронина Г. И., Коргина Н. Ю., Терентьев П. В. Воздействие фитопланктона на кислородный режим рыбохозяйственного водоёма в условиях низких температур // Вестник АГТУ. Сер.: Рыбное хозяйство. – 2016. – № 1. – С. 52–61.
- Руководство по обеспечению качества питьевой воды: 4-е изд. [Guidelines for drinking-water quality - 4th ed.]. – Женева: Всемирная организация здравоохранения, 2017. – 604 с.
- Сигора Г. А., Хоменко Т. Ю., Ничкова Л. А. Проблемы обеспечения экологически безопасного состояния в рекреационных зонах г. Севастополя // Экономика строительства и природопользования. – 2020. – № 2 (75). – С. 125–132.
- Скупневский С. В., Иванов Д. В. Воздействие алюминия и его соединений на функции органов и тканей человека (обзорная статья) // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание, 2023. – № 1. – С. 110–124.

Солдатов А. А., Кладченко Е. С., Рычкова В. Н., Кухарева Т. А., Лантушенко А. О., Мегер Я. В. Морфофункциональные характеристики эритроидных клеток гемолимфы двустворчатого моллюска *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) в условиях сероводородной нагрузки // Биология моря. – 2022. – Т. 48. – № 6. – С. 402–412.

Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях. Комитет по рассмотрению стойких органических загрязнителей. Шестнадцатое совещание, Женева, 11-16 января 2021 г. – 59 с.

Тихонов В. Н. Аналитическая химия алюминия. Серия «Аналитическая химия элементов». – М.: Наука, 1971. – С. 17.

Тищенко А. И., Касаткин А. В. Минералы и минеральные комплексы Крыма. – Бизнес-Информ. – Симферополь, 2020. – 468 с.

Уфимцева М. А., Кузнецов А. В. Экспресс-оценка размерных фракций планктона в акватории г. Севастополь зимой 2021–2022 гг: модельные исследования // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2022. – Т. 7. – № 4. – С. 640–644.

Фелленберг Г. Загрязнение природной среды. – М.: Мир, 1997. – 232 с.

Фрог Б. Н., Скурлатов Ю. И., Штамм Е. В., Вичутинская Е. В. Влияние водорастворимых соединений восстановленной серы на токсические свойства природных и сточных вод // Вестник МГСУ. – 2012. – № 6. – С. 105–113.

Хлебович В. В. Критическая соленость как маркер смены калиевой среды развития жизни на натриевую // Успехи современных биологических наук. – 2015а. – Т. 135. – № 1. – С. 18–20.

Хлебович В. В. Прикладные аспекты концепции критической солености // Успехи современных биологических наук. – 2015б. – Т. 135. – № 3. – С. 272–278.

Шабанов В. В., Маркин В. Н. Методика эколого-водохозяйственной оценки водных объектов. Монография. – М.: ФГБОУ ВПО РГАУ МСХА им. К. А. Тимирязева, 2014. – 166 с.

Шугалай И. В., Гарабджигу А. В., Илюшин М. А., Судариков А. М. Некоторые аспекты влияния алюминия и его соединений на живые организмы // Экологическая химия. – 2012. – Т. 21. – № 3. – С. 172–186.

Янин Е. П., Кузьмич В. Н., Иваницкий О. М. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2016. – № 6. – С. 3–72.

Baker D. B., McCready R. L. Aluminum toxicity in fish: A review // *Aquatic Toxicology*. – 1991. – Vol. 19, Iss. 1–2. – P. 83–96.

Chapman D. V., Dodge J. D., Heaney S. J. Cyst formation in the freshwater dinoflagellate *Ceratium hirundinella* // *J. Phycol.* – 1982. – Vol. 18. – P. 121–129.

Das S., Sultana K. W., Ndhala A. R., Mondal M., Chandra I. Heavy metal pollution in the environment and its impact on health: Exploring green technology for remediation // *Environmental Health Insights*. – 2023. – Vol. 17. – Article 11786302231201259.

Dobson A. W., Erikson K. M., Aschner M. Manganese neurotoxicity // *Annals of the New York Academy of Sciences*. – 2004. – Vol. 1012. – P. 115–128.

Filella M., Belzile N., Chen Y.-W. Antimony in the environment: A review focused on natural waters: II. Relevant solution chemistry // *Earth-Science Reviews*. – 2002. – Vol. 59, Iss. 1–4. – P. 265–285.

Gensemer R. W., Playle R. C. The bioavailability and toxicity of aluminum in aquatic environments // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 1999. – Vol. 29, Iss. 4. – P. 315–450.

Ghani J., Ullah Z., Nawab J., Iqbal J., Waqas M., Ali A., Almutairi M. H., Peluso I., Mohamed H. R. H., Shah M. Hydrogeochemical characterization and suitability assessment of drinking groundwater: Application of geostatistical approach and geographic information system // *Front. Environ. Sci.* – 2022. – Sec. Toxicology, Pollution and the Environment. – Vol. 10. – Article 874464. – P. 1–16.

Graham H. W., Bronikowsky N. The genus *Ceratium* in the Pacific and North Atlantic oceans // *Scientific results of cruise VII of the Carnegie during 1928–1929 under command of captain J. P. Ault*. – Washington, 1944. – D.C. – vii + 209 p.

He M., Wang N., Long X., Zhang C., Ma C., Zhong Q., Wang A., Wang Y., Pervaiz A., Shan J. Antimony speciation in the environment: Recent advances in understanding the biogeochemical processes and ecological effects // *Journal of Environmental Sciences (China)*. – 2019. – Vol. 75. – P. 14–39.

Holmer M., Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: A review // *Freshwater Biology*. – 2001. – Vol. 46, Iss. 4. – P. 431–451.

Müller O. F. *Vermium terrestrium et fluviatiliun, seu animalium infusoriorum, helminthicorum et testaceorum, non marinorum, succincta historia*. – Vol. 1. – Havniæ et Lipsiæ: Heineck and Faber, 1773. – xxxiv + 135 S. – 63, 98.

Muyssen B. T., Bossuyt B. T., Janssen C. R. Inter- and intra-species variation in acute zinc tolerance of field-collected cladoceran populations // *Environmental Toxicology and Chemistry*. – 2005. – Vol. 24, Iss. 5. – P. 1174–1182.

Nwankwegu A. S., Zhang L., Xie D., Ohore O. E., Li Y., Yang G., Yao X., Song Z., Yang Q. Metabolites dynamics exacerbated by external nutrients inputs into a *Ceratium hirundinella*-dominated bloom in the Pengxi River, Three Gorges Reservoir, China // *Aquat. Toxicol.* – 2023. – May. – Vol. 258. – Article 106507.

Peres T. V., Schettinger M. R., Chen P., Carvalho F., Avila D. S., Bowman A. B., Aschner M. Manganese-induced neurotoxicity: a review of its behavioral consequences and neuroprotective strategies // *BMC Pharmacology and Toxicology*. – 2016. – Vol. 17, Iss. 1. – Article 57.

Rand G. M., Petrocelli S. R. *Fundamentals of Aquatic Toxicology: Methods and Applications*. – New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1985. – 666 p. – ISBN 0-89116-382-4.

Reid A., Carlson A., Creed I. F., Eliason E. J., Gell P. A., Johnson P., Kidd K., MacCormack T., Olden J., Omerod S. J., Smol J. P., Taylor W., Tockner K., Vermaire J., Dudgeon D., Cooke S. J. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity // *Biological Reviews*. – 2018. – Vol. 94, Iss. 3. – P. 849–873.

Skidmore J. F. Toxicity of zinc compounds to aquatic animals, with special reference to fish // *Quarterly Review of Biology*. – 1964. – Vol. 39. – P. 227–248.

Sournia A. Le genre *Ceratium* (peridinien planctonique) dans le canal de Mozambique. Contribution à une révision mondiale // *Vie et Milieu*. – 1968. – Vol. 18. – P. 375–499.

van Leeuwen H. P., Town R. M., Buffle J., Cleven R. F., Davison W., Puy J., van Riemsdijk W. H., Sigg L. Dynamic speciation analysis and bioavailability of metals in aquatic systems // *Environmental Science & Technology*. – 2005. – Vol. 39, Iss. 22. – P. 8545–8556.

Zaranyica M. F. Concentration of Cd, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn in bream, *Oreochromis macrochir*, during the 1996 mass fish deaths in Lake Chivero, Zimbabwe // *Environ. Sci. and Health*. – 1997. – Vol. 33, Iss. 7. – P. 1895–1906.

Kozintsev A. F., Bobko N. I., Lishaev V. N., Kuznetsov A. V., Anninsky B. E. Mineral Composition of Surface Rocks and Diversity of Microplankton in Freshwater Bodies in the Recreational Zone of Sevastopol // *Ekosistemy*. 2025. Iss. 41. P. 166–179.

During the ecological monitoring of freshwater bodies in the suburbs of Sevastopol from 2023 to 2024, including the pond at Toropova Dacha, the lake near Mount Gasforta, as well as the Inkerman and Kadykovsky quarries, data on the hydrochemical characteristics of these water bodies were collected. The study demonstrated a significant influence of the elemental and mineral composition of surface rocks on the diversity of freshwater microplankton. Elevated amounts of aluminum (up to 2.8 %), manganese (up to 0.6 %), sulfur (0.4 %), and zinc (up to 0.1 %) were detected in the Kadykovsky quarry, correlating with low biodiversity (13 morphotypes) and the dominance of the dinoflagellate algae *Ceratium hirundinella*. The increased nitrate concentrations (up to 20 mg/L) in this water body are likely associated with a one-time anthropogenic impact. In contrast, water bodies with a more balanced chemical composition, such as the pond at Toropova Dacha and the Inkerman quarry, exhibited significant microplankton diversity (up to 48 morphotypes). The hydrochemical parameters of the water were also examined, including pH, temperature, salinity, and concentrations of biogenic elements. The pH of the water was close to neutral (pH=7.1±1.2), with temperature fluctuations ranging from 8 to 22 °C depending on the season. The freshest water was found in the Lake Gasforta (198 ppm), while the highest salinity was recorded in the Kadykovsky quarry (381–504 ppm). Temporal differences in substance concentrations were observed, such as peak nitrate concentration in the Kadykovsky quarry and high phosphate and silicate concentrations in the pond at Toropova Dacha. Microplankton analysis revealed that the dinoflagellate algae *Ceratium hirundinella* dominated in the Kadykovsky quarry, indicating an atypical ecological state. The other water bodies, like the pond at Toropova Dacha and the Inkerman quarry, demonstrated higher microplankton biodiversity, highlighting the importance of a balanced chemical composition of water for ecosystem health. Water bodies with lower concentrations of toxic elements, such as aluminum, manganese, sulfur, and zinc, exhibited greater biodiversity, underscoring the necessity for pollution monitoring to preserve ecosystems. The results of this study emphasize the importance of integrating geochemical and hydrobiological data for effective water resource management in the recreational zone of Sevastopol. Data on the mineral composition of surface rocks and microplankton biodiversity can be used to develop strategies for preventing freshwater ecosystem degradation and ensuring their sustainability.

Key words: minerals, elemental analysis, hydrochemistry, sequential filtration, microscopy, freshwater microplankton, biodiversity, sustainability of biogeocenoses.

Поступила в редакцию 14.03.25

Принята к печати 08.04.25