

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 504.064:574.64

doi: 10.31774/2712-9357-2024-14-1-136-154

Гидрохимический анализ и экотоксикологическая оценка качества вод реки Качи

Денис Михайлович Сытников¹, Галина Валентиновна Кучерик²

^{1,2}Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация

¹sytnikov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3984-8645>

²gvkucherik@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8155-917X>

Аннотация. Цель: провести гидрохимический анализ и дать комплексную экотоксикологическую оценку качества вод р. Качи. **Материалы и методы.** Содержание химических компонентов в поверхностных водах определяли методами титриметрического и фотоколориметрического анализов. Степень загрязненности поверхностных вод рассчитывали методом комплексной оценки по отдельным гидрохимическим показателям, вычисляя комбинаторный индекс загрязнения вод. Альготестирование производили путем измерения оптической плотности культуры микроводорослей хлореллы (*Chlorella vulgaris* Beijer). Для фитотестирования использовали семена двудольных растений – огурца посевного (*Cucumis sativus* L.), сои культурной (*Glycine max* (L.) Merr.) и однодольных – овса посевного (*Avena sativa* L.). Анализировали тест-параметры: всхожесть и энергию прорастания семян, длину корней и проростков. **Результаты.** По данным гидрохимических показателей воды р. Качи были отнесены к олигокальциевым, по величине удельного комбинаторного индекса ($S' = 1,15$) – к слабо загрязненным второго класса. Значения коэффициента комплексности загрязненности вод на протяжении 2012–2018 гг. находились в пределах 12 %. В 2023 г. воды р. Качи были определены как воды средней жесткости (7,4 мг-экв/куб. дм), при этом отмечено снижение средней минерализации вод (566,1 мг/куб. дм) и улучшение их качества по содержанию общего железа (0,12 мг/куб. дм), что соответствовало предельно допустимой концентрации для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового значения. Альгоэффект вод достигал 57 %, а фитоэффект – 87 %. **Выводы.** Использование биологических методов – альготестирования и фитотестирования – показало присутствие токсикантов в водах р. Качи от истока к устью. Отмечена необходимость дополнительного контроля качества речных вод при их использовании, в т. ч. для целей орошения.

Ключевые слова: малые реки, качество вод, гидрохимический анализ, альготестирование, фитотестирование

Для цитирования: Сытников Д. М., Кучерик Г. В. Гидрохимический анализ и экотоксикологическая оценка качества вод реки Качи // Мелиорация и гидротехника. 2024. Т. 14, № 1. С. 136–154. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-1-136-154>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Hydrochemical analysis and ecotoxicological assessment of the Kacha river water quality

Denis M. Sytnikov¹, Galina V. Kucherik²

^{1,2}Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

¹sytnikov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3984-8645>

²gvkucherik@mail.sevsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8155-917X>

Abstract. Purpose: to conduct a hydrochemical analysis and give a comprehensive ecotoxicological assessment of the Kacha river water. **Materials and methods.** The content of chemical components in surface water was determined using titrimetric and photocolometric analyses. The degree of surface water pollution was calculated using a comprehensive assessment method on individual hydrochemical indicators, calculating the combinatorial water pollution index. Algotesting was carried out by measuring the optical density of the chlorella microalgae culture (*Chlorella vulgaris* Beijer). For phytotesting the seeds of dicotyledonous plants – cucumber (*Cucumis sativus* L.), soya bean (*Glycine max* (L.) Merr.) and monocotyledonous plants – common oats (*Avena sativa* L.) were used. Test parameters: seed germination and germination readiness, root and sprout length were analyzed. **Results.** According to the hydrochemical parameters of the Kacha river, the waters were classified as oligohaline, and according to the specific combinatorial index ($S' = 1.15$) they were classified as slightly polluted ones of the second class. The values of the coefficient of complexity of water contamination rate during 2012–2018 were within 12 %. In 2023, the Kacha river water was defined as moderately hard water (7.4 mg-eq/cubic dm), while a decrease in the average water salinity (566.1 mg/cubic dm) and an improvement in its quality in terms of total iron (0.12 mg/cubic dm) were noted, which corresponded to the maximum permissible concentration for water bodies of municipal and amenity water use significance. The water algoeffect reached 57 %, and the phytoeffect – 87 %. **Conclusions.** The use of biological methods – algotesting and phytotesting – showed the presence of toxicants in the Kacha river water from the effluent to the mouth. The need for additional control of the river water quality during its use, including irrigation, was noted.

Keywords: small rivers, water quality, hydrochemical analysis, algotesting, phytotesting

For citation: Sytnikov D. M., Kucherik G. V. Hydrochemical analysis and ecotoxicological assessment of the Kacha river water quality. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2024;14(1):136–154. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-1-136-154>.

Введение. Известно, что состояние малых рек играет существенную роль в воспроизводстве биологических ресурсов, что имеет большое экологическое и хозяйственное значение. Малые реки формируют общий речной сток, соответственно, от их состояния будет зависеть и его качество [1, 2]. Необходимо также отметить большое рекреационное значение малых рек для отдельных территорий.

Возникающие проблемы малых рек в первую очередь связаны с ухудшением экологического состояния поверхностных вод и имеют антропогенное происхождение. Таким образом, охрана водных объектов требует

направленной деятельности с учетом местных особенностей, в т. ч. по определению качества вод и экотоксикологической оценке их состояния [2, 3].

Кача – одна из типичных малых рек на Крымском полуострове, она относится к бассейну Черного моря, ее длина составляет около 64 км, водосборный бассейн – 573 км². В границах города федерального значения (ГФЗ) Севастополя гидрогеологические ресурсы устьевой части р. Качи активно используются (Орловский водозабор). Поверхностные ее воды идут также на нужды местного сельского хозяйства и для других целей, что заметно снижает речной сезонный сток.

Департаментом природных ресурсов и экологии ГФЗ Севастополя с целью получения информации о качестве вод р. Качи с притоками, используемых для гидромелиорации земель, а также в культурно-бытовых и рекреационных целях, только в 2016 г. была создана Территориальная система наблюдений за загрязнением поверхностных водных объектов (четыре пункта, где производятся мониторинговые наблюдения по 38 химическим показателям).

Комплексная экологическая оценка состояния водотоков и контроль качества их стока для конкретных целей хозяйственного использования требуют сочетания различных подходов. Среди наиболее часто применяемых методов следует выделить контроль по предельно допустимым концентрациям (ПДК), расчет интегральных показателей (индексов) загрязнения¹ [2], а также биоиндикацию [1, 4] (видовое разнообразие, сапробность и т. д.). Гидрохимический анализ поверхностных вод при этом является обязательным компонентом контроля их качества, однако известно, что биологические методы экотоксикологической оценки (биотестирование) дают возможность составить общее представление о состоянии вод-

¹Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям: РД 52.24.643-2002. Ростов н/Д.: Росгидромет, 2002. 50 с.

ной экосистемы [5, 6] и необходимости применения других, более сложных или дорогостоящих методов.

Сегодня в России и за рубежом среди актуальных методических подходов к биотестированию пресных вод, почв и сопредельных сред следует отнести [4, 7–10]: тестирование с применением низших ракообразных (*Daphnia*, *Ceriodaphnia*), инфузорий (*Paramecium*), альготестирование (микроводоросли *Chlorella*, *Scenedesmus*), а также алгоритмы измерения фитоэффектов с использованием различных одно- и двудольных растений и другие методики.

Цель настоящей работы – произвести гидрохимический анализ и дать комплексную экотоксикологическую оценку качества вод р. Качи с применением актуальных биологических методов.

Материалы и методы. *Объектом* исследования служили воды руслового стока р. Качи, *предметом* – компоненты их гидрохимического состава и экотоксикологическое состояние. Река берет начало на северном склоне Бабуган-яйлы в Крымских горах в месте слияния маловодных рек (балок) Биюк-Узень и Писара под горой Роман-Кош на высоте около 600 м. В границах ГФЗ Севастополя гидрографическая сеть Качи представлена приустьевым однорукавным руслом без притоков, протяженностью 7,1 км. Долина здесь имеет ширину до 2 км, ширина реки составляет 5–30 м и более [11].

Отбор проб для выполнения анализа производили по сезонам в трех точках русла р. Качи: исток – с. Синапное, середина течения – с. Мостовое (Бахчисарайский район, Республика Крым) и устье – с. Орловка (ГФЗ Севастополь), в соответствии с установленными требованиями² с глубины не более 0,5 м. При этом измеряли температуру воды, фиксировали метеорологи-

²Токсикологические методы контроля. Методика определения токсичности вод, почв и донных отложений по ферментативной активности бактерий (колориметрическая реакция): ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.1-96, 16.2:2.2.1-96. М.: ГУАК Минприроды России; ЦЭКА Минприроды России, 1996. 12 с.

ческие показатели и заполняли протоколы по утвержденной форме. В с. Синапное рядом с местом отбора проб ($44,67001^\circ$ с. ш., $34,00667^\circ$ в. д.) находятся сельскохозяйственные угодья, ниже по течению – жилые дома; в с. Мостовое точка отбора проб ($44,73041^\circ$ с. ш., $33,80999^\circ$ в. д.) находилась сразу за чертой частной жилой застройки; в с. Орловка водозабор производили перед местом непосредственного впадения реки в море ($44,72282^\circ$ с. ш., $33,55064^\circ$ в. д.).

Гидрохимический анализ, а также оценку качества вод биологическими методами производили в 2012–2018 и 2023 гг. В общей сложности проанализировано более 36 проб. Содержание химических компонентов в поверхностных водах определяли^{1, 3, 4, 5, 6, 7} в лаборатории биодиагностики окружающей среды методом *титриметрического анализа* (главные ионы и жесткость вод) и *фотоколориметрическим методом*. Степень загрязненности поверхностных вод определяли *методом комплексной оценки* по отдельным гидрохимическим показателям, а также расчетом *комбинаторного индекса* загрязнения вод¹.

Химический анализ вод р. Качи проводился по 16 ингредиентам перечня 1 методики РД 52.24.643-2002¹, в который входят: растворенный в воде кислород, химическое и биохимическое потребление кислорода (ХПК, БПК), сульфаты и хлориды, аммоний-ионы (NH_4^+), нитрит-ионы (NO_2^-), нитрат-ионы (NO_3^-), железо общее ($\text{Fe}_{\text{общ}}$), медь (Cu^{2+}), цинк (Zn^{2+}),

³ГОСТ 4245-72. Вода питьевая. Методы определения содержания хлоридов. Введ. 1974-01-01. М.: Госстандарт СССР ВНИИПО, 2009. 5 с.

⁴Массовая концентрация сульфатов в водах. Методика выполнения измерений титриметрическим методом с нитратом свинца: РД 52.24.401-2006. Ростов н/Д.: Росгидромет, 2006. 16 с.

⁵ГОСТ 31957-2012. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. Введ. 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 25 с.

⁶Массовая концентрация кальция в водах. Методика выполнения измерений титриметрическим методом с трилоном Б: РД 52.24.403-2007. Ростов н/Д.: Росгидромет, 2007. 31 с.

⁷ГОСТ 31954-2012. Вода питьевая. Методы определения жесткости. Введ. 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 11 с.

марганец (Mn^{2+}), никель (Ni^{2+}), а также фенолы, нефтепродукты и синтетические поверхностно активные вещества (СПАВ).

В ходе *альготестирования*⁸ использовали аксеничную культуру микроводорослей хлореллы (*Chlorella vulgaris* Beijer), находящуюся в экспоненциальной фазе роста. Токсический эффект (альгоэффект) фиксировали при снижении оптической плотности тест-культуры более чем на 20 % (ингибирование) или при возрастании оптической плотности более чем на 30 % (стимулирование) после 22 ч инкубирования водорослей с изучаемыми пробами вод с различных участков русла.

Для *фитотестирования* [4, 9] использовали семена трех видов растений: два представителя двудольных – огурец посевной (*Cucumis sativus* L.) сорта Феникс (F1), соя культурная (*Glycine max* (L.) Merr.) сорта Арлета и один представитель однодольных – овес посевной (*Avena sativa* L.) сорта Скакун. Анализировали изменение таких *тест-параметров*, как всхожесть, энергия прорастания, длина корней и проростков при их проращивании в специальных вертикально расположенных пластиковых планшетах. По отклонению тест-параметров от контроля ($\geq 20\%$) судили о токсическом эффекте (фитоэффекте) изучаемых вод с различных участков русла.

Статистическую обработку полученных данных проводили с учетом рекомендаций в соответствующих методиках по установленным показателям промежуточной повторяемости и прецизионности. В таблицах, на рисунке и в тексте представлены проценты, средние арифметические, стандартные ошибки и наименьшая существенная разность (НСР). Достоверность разницы значений оценивали, используя 5 % уровень значимости ($P \leq 0,05$).

⁸Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления: ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04, 16.1:2:2.3:3.7-04, ФР.1.39.2015. 20001. М., 2014. 37 с.

Результаты и обсуждение. Лабораторный контроль содержания *главных ионов* позволяет определить концентрацию в речной воде катионов кальция (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}), а также хлорид- (Cl^-) и сульфат-анионов (SO_4^{2-}). Анализ качества вод р. Качи по главным ионам и жесткости¹ проводился в 2023 г. Результаты химического анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание главных ионов и железа в водах р. Качи от истока к устью

В мг/дм³

Table 1 – Content of principle ions and iron in the Kacha river water from effluent to the mouth

In mg/dm³

Ион	Участок русла		
	Исток (с. Синапное)	Середина течения (с. Мостовое)	Устье (с. Орловка)
Cl^-	14,2 ± 1,11	21,3 ± 1,05	85,1 ± 8,08
SO_4^{2-}	76,8 ± 5,50	115,2 ± 11,12*	115,2 ± 10,03*
HCO_3^-	256,3 ± 13,09	305,1 ± 22,50	305,1 ± 2,66
Ca^{2+}	80,2 ± 1,80	130,3 ± 7,75	132,3 ± 6,56
Mg^{2+}	14,6 ± 1,20	23,1 ± 2,05	23,1 ± 1,95
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	0,08 ± 0,01	0,13 ± 0,01*	0,15 ± 0,01*

Примечание – «*» – показатель превышает ПДК⁹.

Среди пресных вод, в зависимости от величины солесодержания, выделяют воды ультрапресные (менее 100 мг/дм³), маломинерализованные (100–200 мг/дм³), среднеминерализованные (200–500 мг/дм³) и повышенной минерализации (500–1000 мг/дм³)¹. Из полученных нами данных (см. таблицу 1) следует, что содержание главных ионов и минерализация по течению реки, от истока к устью, увеличиваются, при этом средняя минерализация вод составила 566,1 мг/дм³.

По результатам анализа вода р. Качи, отобранная в границах с. Синапное, отнесена к среднеминерализованным, воды, отобранные из реки в

⁹Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ М-ва сел. хоз-ва Рос. Федерации от 13 дек. 2016 г. № 552. 91 с.

границах с. Мостовое и Орловка, – к категории повышенной минерализации. По изученным в данный период критериям ионного состава воды р. Качи были отнесены к олигокальциевым¹⁰. К числу олигокальциевых относятся объекты с содержанием солей 0,5–5 ‰, что соответствует средней минерализации около 500–5000 мг/дм³.

По нормам, установленным для водных объектов рыбохозяйственного значения⁶, было отмечено превышение ПДК_{рх} для показателей SO₄²⁻ и Fe_{общ} в пробах вод, отобранных из реки, в границах с. Мостовое и Орловка. Однако по нормам, установленным для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового значения¹¹, эти же показатели находились в пределах ПДК_{пв} по всему течению реки.

Результаты определения жесткости вод р. Качи от истока к устью представлены в таблице 2, из данных которой следует, что полученные показатели превышают нормативы для вод, используемых в системах централизованного водоснабжения⁸.

Таблица 2 – Показатели общей жесткости вод р. Качи от истока к устью

В мг-экв/дм³

Table 2 – Indicators of the total hardness of the Kacha river water from the effluent to the mouth

In mg-eq/dm³

Участок русла	Общая жесткость	Среднее со всех участков русла	Норматив ⁸
Исток (с. Синапное)	5,3 ± 0,3	7,4 ± 0,5*	7,0
Середина течения (с. Мостовое)	8,4 ± 0,7*		
Устье (с. Орловка)	8,5 ± 0,6*		
Примечание – «*» – показатель превышает норматив.			

По показателям общей жесткости природные воды делятся на группы¹. По изученным нами образцам речные воды, отобранные в пределах с. Си-

¹⁰Дедю И. И. Экологический энциклопедический словарь. Кишинев: Гл. ред. Молд. совет. энцикл., 1989. 406 с.

¹¹Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: СанПиН 1.2.3685-21: утв. Гл. гос. санитар. врачом Рос. Федерации 28.01.21. 988 с.

напное ($5,3 \text{ мг-экв/дм}^3$), были отнесены к «водам средней жесткости», отобранные в пределах с. Мостовое ($8,4 \text{ мг-экв/дм}^3$) и Орловка ($8,5 \text{ мг-экв/дм}^3$) – к «жестким водам».

На протяжении 2012–2018 гг. в нашей лаборатории также производился гидрохимический анализ вод р. Качи по отдельным ингредиентам. При этом в течение нескольких лет наблюдений фиксировалась тенденция к повышению минерализации вод. На рисунке 1 представлена гистограмма, дающая представление об общей усредненной динамике содержания главных ионов по сезонам.

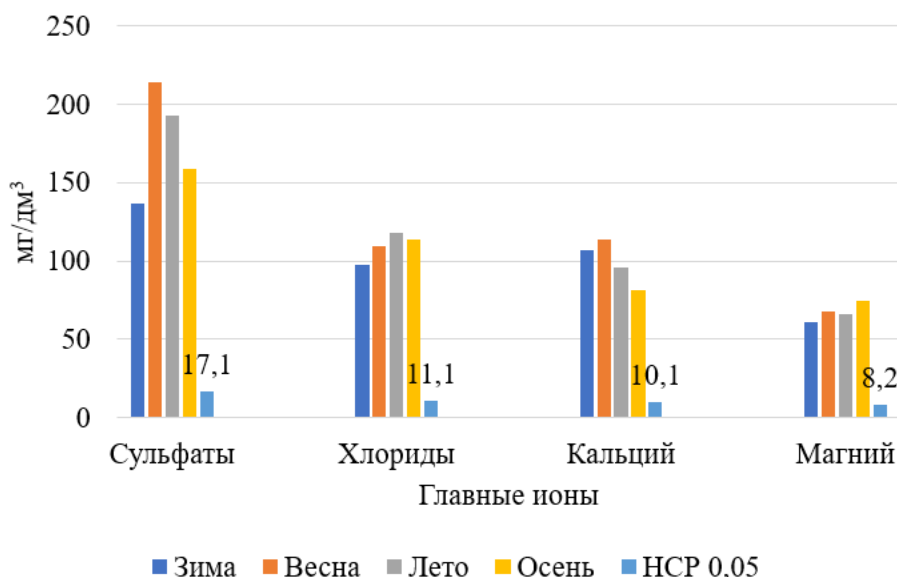


Рисунок 1 – Содержание главных ионов в водах р. Качи
Figure 1 – Content of principle ions in the Kacha river water

Здесь преобладали анионы: сульфаты и хлориды, при этом отмечалась умеренная выраженность сезонных колебаний всех изученных показателей. Содержание хлоридов варьировало в пределах $97,7\text{--}118,2 \text{ мг/дм}^3$, магния – $61,4\text{--}75,0 \text{ мг/дм}^3$. С весны наблюдалось снижение концентрации сульфат-ионов с $213,6$ до $136,4 \text{ мг/дм}^3$, а также катионов кальция с $113,6$ до $81,8 \text{ мг/дм}^3$, продолжающееся до конца осени. Изменение концентрации главных ионов в зависимости от сезона обычно связано с режимом уровня реки или сезонными особенностями стока ее притоков.

Комплексная оценка степени загрязненности⁴ позволяет выразить загрязненность воды одновременно по перечню ингредиентов и показателей качества, классифицировать воду по степени загрязненности и подготовить аналитическую информацию для государственных органов или заинтересованных организаций. По значению условного *коэффициента комплексности* для одного значения ПДК выбирается метод оценки степени загрязненности воды водного объекта. Если обнаруживается незначительная комплексность загрязненности ($K < 10\%$), обусловленная загрязнением единичными ингредиентами, то проводится подробное дифференцированное их обследование⁴. В нашей работе значения коэффициента комплексности загрязненности вод р. Качи на протяжении всего периода наблюдений не превышали 12 %. Загрязняющими ингредиентами при этом были органические вещества (в основном по ХПК), соединения железа и в отдельных случаях нефтепродукты. Проведенный анализ показал ($K > 10\%$), что для точной оценки степени загрязненности вод необходимо использовать *комбинаторный индекс* загрязненности. Расчет указанного индекса производился по следующим показателям (таблица 3).

Таблица 3 – Содержание основных ингредиентов и показатели для расчета комбинаторного индекса загрязнения вод р. Качи

Table 3 – Content of main ingredients and indicators for calculating the combinatorial index of water pollution in the Kacha river

Ингредиент, мг/дм ³	ПДК, мг/дм ³	Число определений (из 16), превышающих ПДК	Повтор превышения ПДК, %	Частный оценочный балл S_a	Частный оценочный балл S_b	Обобщенный оценочный балл, $S_a S_b = S_i$
1	2	3	4	5	6	7
Кислород	9,5* ± 0,5	> 4,0	0	0,0	0,0	0,0
ХПК	32,5* ± 2,3	30,0	81	4,0	2,0	8,0
БПК ₅	2,5 ± 0,1	4,0	0	0,0	0,0	0,0
Сульфаты	175,5 ± 17,2	500,0	0	0,0	0,0	0,0
Хлориды	109,6 ± 1,4	350,0	0	0,0	0,0	0,0
Азот аммонийный	0,18 ± 0,02	1,5	0	0,0	0,0	0,0

Продолжение таблицы 3

Table 3 continued

	1	2	3	4	5	6	7
Нитриты	0,14 ± 0,02	3,0	0	0	0,0	0,0	0,0
Нитраты	16,5 ± 1,2	45,0	0	0	0,0	0,0	0,0
Железо	0,48* ± 0,05	0,3	14	42	3,7	2,8	10,4
Медь	0,01 ± 0,001	0,1	0	0	0,0	0,0	0,0
Цинк	< 0,05	1,0	0	0	0,0	0,0	0,0
Марганец	< 0,10	0,1	0	0	0,0	0,0	0,0
Никель	< 0,02	0,02	0	0	0,0	0,0	0,0
Фенолы	< 0,001	0,001	0	0	0,0	0,0	0,0
Нефтепродукты	0,12 ± 0,02	0,3	0	0	0,0	0,0	0,0
СПАВ	0,17 ± 0,02	0,5	0	0	0,0	0,0	0,0
Примечание – «*» – показатель превышает ПДК ⁸ .							

Значение комбинаторного индекса загрязненности воды (S) в р. Каче определяли как сумму обобщенных оценочных баллов (S_i) по каждому ингредиенту, превысившему ПДК⁴, т. е.: $S = 8 + 10,4 = 18,4$. Удельный комбинаторный индекс (S') при этом составил: $S' = 18,4 : 16 = 1,15$.

К критическим показателям загрязнения вод ($S_{ij} \geq 9$) было отнесено содержание железа, коэффициент запаса (k) которого был равен 0,9. В соответствии с классификацией качества воды по степени загрязненности⁴, которая осуществляется с учетом комбинаторного индекса (S), числа критических показателей, коэффициента запаса (k) и количества учтенных в оценке ингредиентов и показателей, воды р. Качи были отнесены к классу 2 как слабо загрязненные.

Известно, что качественные показатели стока зависят от количества выпавших осадков. По данным ближайших к бассейну реки метеостанций (Почтовое и Севастополь) установлено, что среднегодовое количество осадков на протяжении 2012–2018 гг. находилось на уровне 426 мм и несколько уступало аналогичному показателю 2023 г. – 506 мм.

Сопоставив результаты гидрохимического анализа 2012–2018 и 2023 гг., можно сделать вывод о том, что общая минерализация вод, имевшая тенденцию к возрастанию, несколько снизилась. Например, среднее содержа-

ние сульфатов упало с $(175,5 \pm 17,2)$ до $(102,4 \pm 8,9)$ мг/дм³, а хлоридов – с $(109,6 \pm 4,4)$ до $(40,2 \pm 3,4)$ мг/дм³. Наблюдается также улучшение качества вод по содержанию общего железа с $(0,48 \pm 0,17)$ до $(0,12 \pm 0,01)$ мг/дм³, что соответствует ПДК для объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового значения⁸. При этом в целом воды характеризуются как средне жесткие.

По данным паспортизации прудов и водоемов, в бассейне р. Качи в границах ГФЗ Севастополя возле с. Орловка имеется два пруда. Объекты питаются за счет реки и используются для орошения земель. Исходя из данных проведенного нами гидрохимического анализа, можно оценить показатели пригодности речных вод для орошения на данном участке русла.

Известно, что для обеспечения комплексной оценки качества воды для орошения следует учитывать агрономические, технические и экологические критерии. С точки зрения пригодности вод для орошения земель, прежде всего, оценивают общую минерализацию, солевой состав, содержание ионов, а также токсикологические и санитарно-гигиенические показатели [12, 13]. Так, по допустимым уровням минерализации поливной воды изученные нами в 2023 г. воды ($566,1$ мг/дм³) можно отнести к «не опасным» (I класс). В соответствии с классификацией оросительной воды по степени опасности засоления почв (показатель $Cl/SO_4^{2-} = 0,7$) воды р. Качи в нижней части русла являются пригодными для орошения большинства типов почв и сельскохозяйственных культур (II класс). По показателю магниевое осолонцевания почв воды реки ($0,3$ мг-экв/л) также являются безопасными (I класс). По концентрации ионов HCO_3^- ($4,2$ – $5,0$ мг-экв/л) установлена «средняя токсичность» для дождевания сельскохозяйственных культур в изученных водах. Такое содержание гидрокарбонатов в воде может негативно воздействовать на элементы систем капельного орошения. Большинство токсикологических показателей⁸ на протяжении ряда лет соответствовали нормативам (см. таблицу 3).

Для комплексной экотоксикологической оценки качества вод р. Качи в 2023 г. наряду с традиционными гидрохимическими методами были применены актуальные биологические подходы. Из данных таблицы 4 следует, что в ходе *альготестирования* токсический эффект (альгоэффект) установлен в пробах, отобранных из вод р. Качи от истока к устью, который проявлялся в подавлении роста микроводорослей хлореллы на 42–57 %.

Таблица 4 – Влияние вод р. Качи на изменение оптической плотности тест-культуры микроводорослей хлореллы (*Chlorella vulgaris* Beijer)

Table 4 – Effect of the Kacha river water on changes in optical density of the test culture of chlorella microalgae (*Chlorella vulgaris* Beijer)

Участок русла	Степень разбавления, разы	Оптическая плотность, единицы	Отклонение от контроля, %	Альгоэффект ⁵
Контроль	0	0,158 ± 0,005	0	не оказывает
Исток (с. Синапное)	1 (нативная проба)	0,091 ± 0,002	42	оказывает
	3	0,153 ± 0,003	3	не оказывает
	9	0,187 ± 0,011	-18	не оказывает
Середина течения (с. Мостовое)	1 (нативная проба)	0,092 ± 0,004	42	оказывает
	3	0,157 ± 0,006	1	не оказывает
	9	0,204 ± 0,006	-29	не оказывает
Устье (с. Орловка)	1 (нативная проба)	0,068 ± 0,002	57	оказывает
	3	0,155 ± 0,002	2	не оказывает
	9	0,182 ± 0,007	-15	не оказывает

При этом зафиксированный альгоэффект преодолевался разбавлением изученных вод в три раза и более, что могло приводить также к стимулированию роста тест-культуры.

В ходе *фитотестирования* вод с различных участков русла р. Качи, в соответствии с рекомендациями методик, использовали семена однодольных и двудольных растений. При этом по данным об энергии прорастания семян как однодольных, так и двудольных растений не замечено существенной реакции на внесение в среду их проращивания исследуемых речных вод, энергия прорастания достигала во многих случаях 100 %, как и в контроле (таблица 5).

Таблица 5 – Влияние вод р. Качи на формирование проростков культур однодольных (*Avena sativa* L.) и двудольных (*Cucumis sativus* L., *Glycine max* (L.) Merr.) растений
Table 5 – Effect of the Kacha river water on the formation of seedlings of monocotyledonous (*Avena sativa* L.) and dicotyledonous (*Cucumis sativus* L., *Glycine max* (L.) Merr.) plants

Участок русла	Энергия прорастания, %	Длина корня, мм	Отклонение от контроля, %	Длина стебля, мм	Отклонение от контроля, %
Овес посевной (<i>Avena sativa</i> L.)					
Контроль	100	33,1 ± 4,6	0	19,6 ± 2,6	0
Исток (с. Синапное)	87	42,9 ± 4,9	30*	17,7 ± 1,3	-10
Середина течения (с. Мостовое)	100	45,0 ± 4,7	36*	21,9 ± 3,1	12
Устье (с. Орловка)	87	33,9 ± 1,8	2	7,0 ± 1,7	-64*
Огурец посевной (<i>Cucumis sativus</i> L.)					
Контроль	100	36,9 ± 4,4	0	16,0 ± 1,5	0
Исток (с. Синапное)	100	62,3 ± 4,8	69*	19,8 ± 1,6	24*
Середина течения (с. Мостовое)	100	57,7 ± 1,5	56*	16,9 ± 1,5	6
Устье (с. Орловка)	100	68,9 ± 4,7	87*	20,7 ± 2,7	29*
Соя культурная (<i>Glycine max</i> (L.) Merr.)					
Контроль	80	17,0 ± 3,2	0	--	--
Исток (с. Синапное)	98	25,8 ± 3,6	52*	--	--
Середина течения (с. Мостовое)	98	28,0 ± 4,1	65*	--	--
Устье (с. Орловка)	98	31,1 ± 3,1	83*	--	--
Примечание – «*» – наблюдается фитозэффект (ФЭi, %) [4, 9]; «--» – показатель не определяли.					

При использовании в качестве тест-объекта овса посевного зафиксировано наличие токсического эффекта (фитозэффекта (ФЭi) – отклонение от контроля, %) речных вод с отдельных участков русла в отношении корней (ФЭi = 30...36 %) или стеблей (ФЭi = 64 %) проростков. Традиционно используемый в фитотестировании представитель однодольных – овес дает наиболее стабильные и воспроизводимые результаты по сравнению с другими культурами.

В качестве представителей двудольных растений были выбраны огурец посевной, отличающийся высокой энергией прорастания, и соя культурная, как реагирующая на токсичность. В ходе исследования установлено проявление фитозэффекта изучаемых речных вод в отношении корней про-

ростков огурца ($\Phi Э i = 56 \dots 87 \%$) и сои ($\Phi Э i = 52 \dots 83 \%$), а также в отдельных случаях в отношении стеблей проростков огурца ($\Phi Э i = 24 \dots 29 \%$).

Наблюдаемое ингибирующее влияние речных вод на изученные тест-организмы может быть связано с их повышенной общей жесткостью, а также с суммарным эффектом содержания в пробах как тяжелых металлов, так и других неопределяемых ингредиентов. Результаты биотестирования указывают на необходимость дополнительного контроля вод при их использовании для целей орошения земель.

Среди причин проявления фитоэффекта может быть как продолжающееся загрязнение стока, так и специфичность применяемых биологических методов. Возможное ухудшение состояния вод р. Качи может быть связано с увеличением застраиваемой территории и площади сельхозугодий (распаханность до 65 %), водовыпусками с объектов местного ГУПС «Водоканал», а также с отсутствием централизованного водоотведения в селах на территории водосборного бассейна.

К числу первостепенных мероприятий, направленных на снижение уровня антропогенной нагрузки, необходимо отнести учет объемов отбираемых вод, контроль за работой сельскохозяйственных предприятий, ведением приусадебных и дачных хозяйств, а также повсеместное канализование частной застройки. Необходима также разработка природоохранных мероприятий в бассейне реки с учетом особенностей существующей антропогенной нагрузки.

Выводы. По изученным на протяжении ряда лет гидрохимическим показателям воды р. Качи отнесены к олигогалинным и, с учетом удельного комбинаторного индекса ($S' = 1,15$), определены как слабо загрязненные второго класса. Значение коэффициента комплексности загрязненности вод на протяжении 2012–2018 гг. не превышало 12 %. В 2023 г. воды р. Качи в целом были определены как воды средней жесткости ($7,4 \text{ мг-экв/дм}^3$), при этом было отмечено снижение средней минерализации вод ($566,1 \text{ мг/дм}^3$)

и улучшение их качества по содержанию общего железа ($0,12 \text{ мг/дм}^3$), что соответствовало ПДК для объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения.

Использование биологических методов – альготестирования и фитотестирования – показало нарастающее присутствие токсикантов в водах р. Качи от истока к устью. Альгоэффект при этом достигал 57 %, а фитоэффект – 87 %. Токсический эффект нивелировался разбавлением вод в три раза и более. Таким образом, несмотря на улучшение гидрохимических показателей, сделан вывод о необходимости дополнительного контроля качества вод р. Качи при их использовании, в т. ч. для целей орошения.

Список источников

1. Савицкая К. Л. Макрофиты как индикаторы экологического состояния малых рек Минской области // Водные ресурсы. 2017. Т. 44, № 6. С. 663–672. DOI: 10.7868/S0321059617060074. EDN: ZQTAWH.
2. Волкова Н. Е., Иванютин Н. М., Подовалова С. В. Оценка гидроэкологического состояния водных объектов бассейна реки Малый Салгир // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2021. № 3. С. 27–36. EDN: CPLLJV.
3. Лаптева Е. М., Лоскутова О. А., Холопов Ю. В. Экологическое состояние малой северной реки после аварийного выброса нефтепродуктов // Водные ресурсы. 2019. Т. 46, № 5. С. 523–532. DOI: 10.31857/S0321-0596465523-532. EDN: PMAWYR.
4. Методология биодиагностики почв и особенности некоторых методов биоиндикации и биотестирования (обзор) / В. А. Терехова, С. А. Кулачкова, Е. В. Морачевская, А. П. Кирюшина // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023. № 2. С. 35–45. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-35-45. EDN: KOJVCM.
5. Ложкина Р. А., Томилина И. И., Гапеева М. В. Долговременные изменения качества воды Рыбинского водохранилища по данным биотестирования // Трансформация экосистем. 2020. Т. 3, № 3(9). С. 125–138. DOI: 10.23859/estr-200323. EDN: YUGGKY.
6. Kucherik G. V., Omelchuk Yu. A., Sytnikov D. M. Biotesting of quarry lakes as an alternative source of drinking water supply // Scientific Notes of Crimean V. I. Vernadsky Federal University. Biology. Chemistry. 2022. Vol. 8(74), № 2. P. 87–92. EDN: BRPHAR.
7. Инструментальные методы биотестирования вод, почв, грунтов и отходов / Ю. С. Григорьев, Т. Л. Шашкова, Е. С. Стравинскене, М. А. Субботин, Н. К. Артына, А. А. Андреев, И. С. Кравчук, К. В. Агафонов // Метеорология и гидрология. 2023. № 5. С. 96–106. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-5-96-106. EDN: IYNHAL.
8. Добровольский Г. В., Терехова В. А., Дгебуадзе Ю. Ю. Биодиагностика в экологической оценке почв и сопредельных сред // Поволжский экологический журнал. 2013. № 4. С. 365–367. EDN: QCFAQH.
9. Тишин А. С., Тишина Ю. Р. Методы и способы фитотестирования почв: обзор // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 11(113). С. 93–98. DOI: 10.23670/IRJ.2021.113.11.052. EDN: VKBBHC.
10. Экотоксичность городской пыли: существующие практики и перспективы

применения биотестирования (обзор) / О. В. Николаева, С. А. Кулачкова, А. А. Астайкина, Е. В. Федосеева, В. А. Терехова // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2022. № 3. С. 3–19. EDN: TVRANF.

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

12. Методические указания по совершенствованию технологий орошения и повышению эффективности использования местного стока для орошения земель сельскохозяйственного назначения / В. Н. Щедрин, Ю. Ф. Снопич, Г. А. Сенчуков, В. Д. Гостищев, А. С. Капустян, Л. М. Докучаева, А. С. Штанько, А. Л. Кожанов, А. А. Кузьмичев. Новочеркасск, 2015. 147 с. EDN: XATSYR.

13. Волкова Н. Е., Кременской В. И. Подходы к снижению негативных последствий использования слабо- и маломинерализованных вод в орошаемом земледелии // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2023. Т. 13, № 4. С. 224–242. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1407&ysclid=ls377qx8ox905629613> (дата обращения: 15.12.2023). DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-4-224-242. EDN: AYDCWT.

References

1. Savitskaya K.L., 2017. *Makrofity kak indikatory ekologicheskogo sostoyaniya malykh rek Minskoy oblasti* [Macrophytes as indicators of the ecological state of small rivers in Minsk region]. *Vodnye resursy* [Water Resources], vol. 44, no. 6, pp. 663-672, DOI: 10.7868/S0321059617060074, EDN: ZQTAWH. (In Russian).

2. Volkova N.E., Ivanyutin N.M., Podovalova S.V., 2021. *Otsenka gidroekologicheskogo sostoyaniya vodnykh ob"ektov basseyna reki Malyy Salgir* [Assessment of the hydroecological state of water bodies in the Malyy Salgir river basin]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya* [Moscow University Bulletin. Series 5, Geography], no. 3, pp. 27-36, EDN: CPLJLV. (In Russian).

3. Lapteva E.M., Loskutova O.A., Kholopov Yu.V., 2019. *Ekologicheskoe sostoyanie maloy severnoy reki posle avariynogo vybrosa nefteproduktov* [Ecological state of the small northern river after an emergency release of oil products]. *Vodnye resursy* [Water Resources], vol. 46, no. 5, pp. 523-532, DOI: 10.31857/S0321-0596465523-532, EDN: PMAWYR. (In Russian).

4. Terekhova V.A., Kulachkova S.A., Morachevskaya E.V., Kiryushina A.P., 2023. *Metodologiya biodiagnostiki pochv i osobennosti nekotorykh metodov bioindikatsii i biotestirovaniya (obzor)* [A soil biodiagnostics methodology and features of some bioindication and biotesting methods (review)]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie* [Lomonosov Soil Science Journal], no. 2, pp. 35-45, DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-35-45, EDN: KOJVCM. (In Russian).

5. Lozhkina R.A., Tomilina I.I., Gapeeva M.V., 2020. *Dolgovremennye izmeneniya kachestva vody Rybinskogo vodokhranilishcha po dannym biotestirovaniya* [Long-term dynamics of the water quality in the Rybinsk reservoir according to biotesting]. *Transformatsiya ekosistem* [Ecosystem Transformation], vol. 3, no. 3(9), pp. 125-138, DOI: 10.23859/estr-200323, EDN: YUGGKY. (In Russian).

6. Kucherik G.V., Omelchuk Yu.A., Sytnikov D.M., 2022. Biotesting of quarry lakes as an alternative source of drinking water supply. *Scientific Notes of Crimean V. I. Vernadsky Federal University. Biology. Chemistry*, vol. 8(74), no. 2, pp. 87-92, EDN: BRPHAR.

7. Grigoriev Yu.S., Shashkova T.L., Stravinskene E.S., Subbotin M.A., Artyna N.K., Andreev A.A., Kravchuk I.S., Agafonov K.V., 2023. *Instrumental'nye metody biotestirovaniya vod, pochv, gruntov i otkhodov* [Instrumental bioassays for assessing water, soil, and waste toxicity]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], no. 5, pp. 96-106, DOI: 10.52002/0130-2906-2023-5-96-106, EDN: IYHXAL. (In Russian).

8. Dobrovolsky G.V., Terekhova V.A., Dgebuadze Yu.Yu., 2013. *Biodiagnostika v ekologicheskoy otsenke pochv i sopredel'nykh sred* [Biodiagnostics in ecological assessment of soils and adjacent environments]. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal* [Volga Ecological Journal], no. 4, pp. 365-367, EDN: QCFAQH. (In Russian).

9. Tishin A.S., Tishina Yu.R., 2021. *Metody i sposoby fitotestirovaniya pochv: obzor* [Methods of soil phytotesting: review]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal], no. 11(113), pp. 93-98, DOI: 10.23670/IRJ.2021.113.11.052, EDN: VKBBHC. (In Russian).

10. Nikolaeva O.V., Kulachkova S.A., Astaikina A.A., Fedoseeva E.V., Terekhova V.A., 2022. *Ekotoksichnost' gorodskoy pyli: sushchestvuyushchie praktiki i perspektivy primeneniya biotestirovaniya (obzor)* [Ecotoxicity of urban dust: existing practices and prospects for the bio-assay application (review)]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie* [Lomonosov Soil Science Journal], no. 3, pp. 3-19, EDN: TVRANF. (In Russian).

11. Oliferov A.N., Timchenko Z.V., 2005. *Reki i ozera Kryma* [Rivers and Lakes of Crimea]. Simferopol, Dolya Publ., 216 p. (In Russian).

12. Shchedrin V.N., Snipich Yu.F., Senchukov G.A., Gostishchev V.D., Kapustyan A.S., Dokuchaeva L.M., Shtanko A.S., Kozhanov A.L., Kuzmichev A.A., 2015. *Metodicheskie ukazaniya po sovershenstvovaniyu tekhnologiy orosheniya i povysheniyu effektivnosti ispol'zovaniya mestnogo stoka dlya orosheniya zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya* [Guidelines for Improving Irrigation Technologies and Increasing the Efficiency of Using Local Runoff for Irrigating Agricultural Lands]. Novocherkassk, 147 p., EDN: XATSYP. (In Russian).

13. Volkova N.E., Kremenskoj V.I., 2023. [Approaches to reducing the negative consequences of using brackish low-mineralized waters in irrigated agriculture]. *Melioratsiya i gidrotekhnika*, vol. 13, no. 4, pp. 224-242, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1407&ysclid=ls377qx8ox905629613> [accessed 15.12.2023], DOI: 10.31774/2712-9357-2023-13-4-224-242, EDN: AYDCWT. (In Russian).

Информация об авторах

Д. М. Сытник – доцент кафедры радиоэкологии и экологической безопасности, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация, sytnikov@list.ru, AuthorID: 1080713, ORCID ID: 0000-0002-3984-8645;

Г. В. Кучерик – заведующий кафедрой радиоэкологии и экологической безопасности, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация, gvkucherik@mail.sevsu.ru, AuthorID: 854171, ORCID ID: 0000-0001-8155-917X.

Information about the authors

D. M. Sytnikov – Associate Professor of the Department of Radioecology and Environmental Safety, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, sytnikov@list.ru, AuthorID: 1080713, ORCID ID: 0000-0002-3984-8645;

G. V. Kucherik – Head of the Department of Radioecology and Environmental Safety, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation, gvkucherik@mail.sevsu.ru, AuthorID: 854171, ORCID ID: 0000-0001-8155-917X.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 26.01.2024; одобрена после рецензирования 12.02.2024;
принята к публикации 14.02.2024.
The article was submitted 26.01.2024; approved after reviewing 12.02.2024; accepted for
publication 14.02.2024.*