



Научная статья
УДК 550.46:504.064 (571.63)
DOI: 10.35735/26870509_2026_27_6
EDN: PQNKOT

Тихоокеанская география. 2026. № 3. С. 64–79
Pacific Geography. 2026;(3):64-79

Распределение растворенного органического углерода и биогенных элементов в поверхностных водах бассейна озера Ханка

Татьяна Николаевна ЛУЦЕНКО
кандидат географических наук, старший научный сотрудник
luts@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5433-8248>

Владимир Маркович ШУЛЬКИН
доктор географических наук, главный научный сотрудник
shulkin@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4610-2582>

Анна Геннадьевна БОЛДЕСКУЛ
кандидат географических наук, старший научный сотрудник
boldeskul@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9014-2405>

Владимир Владимирович ШАМОВ
доктор географических наук, главный научный сотрудник
vlshamov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9310-1836>

Светлана Григорьевна ЮРЧЕНКО
кандидат географических наук, старший научный сотрудник
yurchenko@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2008-1103>

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Аннотация. Оценка изменения качества воды крупнейшего трансграничного российско-китайского оз. Ханка возможна только при учете сезонности биогеохимических процессов. Рассмотрено сезонное изменение концентраций растворенного органического углерода (POY) и биогенных элементов (Si, P, N-NO₃) на фоне изменчивости общих гидрохимических параметров в основных реках бассейна оз. Ханка и в самом озере в 2025 г. Минерализация и содержание макроионов в реках изменяются в соответствии с вариациями водного режима: минимальны в половодье и возрастают в межень. Макросостав озерных вод практически постоянен и в основном соответствует средневзвешенному составу рек. Сезонность концентраций биогенных элементов в реках контролируется в большей степени интенсивностью их мобилизации на водосборах при дополнительной роли динамики водного стока. Судя по спектральным характеристикам воды, POY в реках (SUVA₂₅₄ 2.0–4.1 л/мг*м) содержит значительную долю ароматических гуминовых веществ, тогда как POY озера (SUVA₂₅₄ 1.8–2.2 л/мг*м) состоит преимущественно из автохтонных углеводов. Концентрации биогенных элементов в озере и характер их сезонной изменчивости отличаются от речных, что свидетельствует о доминировании внутриводоемных процессов. Для растворенного Si – это поглощение фитопланктоном, особенно выраженное зимой и весной во время преобладания диатомовых. Для фосфора – мобилизация из взвеси и донных отложений летом и осенью, что обеспечивает повы-

шенную концентрацию растворенных форм фосфора на большей части акватории озера до уровня, превышающего речной. Особый характер протекания биогеохимических процессов обнаружен в юго-восточном побережье оз. Ханка, находящемся под прямым влиянием речного и болотного стока. Здесь концентрация биогенных элементов значительно понижена на протяжении всего года по сравнению с основной водной массой, вероятно за счет интенсивной ассимиляции фитопланктоном.

Ключевые слова: оз. Ханка, реки, РОУ, биогенные элементы, $SUVA_{254}$

Для цитирования: Луценко Т.Н., Шулькин В.М., Болдескул А.Г., Шамов В.В., Юрченко С.Г. Распределение растворенного органического углерода и биогенных элементов в поверхностных водах бассейна озера Ханка // Тихоокеанская география. 2026. № 3. С. 64–79. https://doi.org/10.35735/26870509_2026_27_6

Original article

Distribution of dissolved organic carbon and nutrients in the surface waters of the Khanka Lake basin

Tatiana N. LUTSENKO

Candidate of Geographical Sciences, Senior research associate

luts@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5433-8248>

Vladimir M. SHULKIN

Doctor of Geographical Sciences, Chief research associate

shulkin@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4610-2582>

Anna G. BOLDESKUL

Candidate of Geographical Sciences, Senior research associate

boldeskul@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9014-2405>

Vladimir V. SHAMOV

Doctor of Geographical Sciences, Chief research associate

vlshamov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9310-1836>

Svetlana G. YURCHENKO

Candidate of Geographical Sciences, Senior research associate

yurchenko@tigdvo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2008-1103>

Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. To assess changes in the water quality of Lake Khanka, the largest transboundary Russian-Chinese lake, it is necessary to consider the seasonality of biogeochemical processes. This paper examines seasonal changes in the concentrations of dissolved organic carbon (DOC) and nutrients (Si, P, N- NO_3) taking into account variability in general hydrochemical parameters in the main rivers of the Lake Khanka basin and in the lake itself. Mineralization and major ions concentrations in the rivers vary in accordance with seasonal variations in the water regime; they are minimal during high water and increase during low water. The major ions content in the lake waters is almost constant and corresponds to the average-weighted composition of the rivers. An exception is coastal waters, which are directly influenced by river runoff. The seasonality of nutrient concentrations in rivers is largely controlled by the intensity of their mobilization in the catchments with the additional role of variations in water runoff. Based on the river spectral indices ($SUVA_{254}$ 2.0–4.1 l/mg*m), river water DOC contains a significant proportion of

aromatic humic substances, while lake water DOC (SUVA_{254} 1.8–2.2 l/mg*m) consists predominantly of autochthonous carbohydrates. The concentration and seasonal variability of nutrients in the lake compared to rivers indicate the decisive role of the intra-lake processes. For dissolved Si, this is uptake by phytoplankton, especially pronounced in winter and spring when diatom species predominate. For phosphorus, this is mobilization from suspended matter and bottom sediments in summer and autumn, resulting in elevated concentrations of dissolved phosphorus over most of the lake, exceeding river levels. A special pattern of biogeochemical processes has been observed in the south-eastern coastal waters of Lake Khanka, directly influenced by river runoff, where nutrient concentrations are significantly lower than in the main body of water around the year, likely due to increased assimilation by phytoplankton.

Keywords: Khanka Lake, rivers, DOC, biogenic elements, SUVA_{254}

For citation: Lutsenko T.N., Shulkin V.M., Boldeskul A.G., Shamov V.V., Yurchenko S.G. Distribution of dissolved organic carbon and biogenic elements in the surface waters of the Khanka Lake basin. *Pacific Geography*. 2026;(3):64–79. (In Russ.). https://doi.org/10.35735/26870509_2026_27_6

Введение

Озеро Ханка – крупнейший трансграничный водоем юга Дальнего Востока России, отличается значительными рыбными ресурсами, богатством и разнообразием растительного и животного мира. Озеро обладает высоким рекреационным потенциалом. Российско-китайская граница делит озеро на две части, около $\frac{3}{4}$ акватории принадлежит России. Китайская часть бассейна озера расположена в провинции Хэйлунцзян. Это территория с гораздо более значительной, чем на российской стороне, плотностью и численностью населения и высокой интенсивностью сельского хозяйства [1]. Основные реки, питающие оз. Ханка, – Комиссаровка, Мельгуновка, Илистая, Спасовка. Своеобразие озера в том, что при огромной площади акватории (4070 км²) его средняя глубина – 4.5 м, поэтому водная масса хорошо перемешивается и прогревается. Другая отличительная черта заключается в высоком содержании взвеси за счет взмучивания верхнего слоя донных отложений при ветровом перемешивании. Гидробиологические исследования показали, что значения биопродуктивности в оз. Ханка значительно выше, чем во многих водоемах и водотоках [2, 3].

В 70-е гг. прошлого века началось активное освоение водных ресурсов оз. Ханка для выращивания приморского риса, а 80-е гг. стали временем расцвета культуры риса на российской стороне бассейна оз. Ханка. По данным статистики в это время в озеро сбрасывалось почти 90 тыс. т стоков, подавляющую часть которых составляли сбросные воды рисовых оросительных систем [4]. Эти воды несли с собой тонны минеральных удобрений и ядохимикатов. В таком режиме развивалось рисоводство, являясь главным источником загрязнения озера и вытекающей из него р. Сунгача, создавая угрозу биоте и проживающему в бассейне оз. Ханка населению.

Различные аспекты природных процессов и характеристик воды оз. Ханка довольно интенсивно изучались ранее [4–9]. В последние 10 лет на передний план вышли проблемы квазициклического изменения уровня воды озера. Большая площадь озера в сочетании с малой глубиной приводят к тому, что даже относительно небольшие изменения водного баланса приводят к заметной трансформации береговой линии. В частности, в период 2004–2016 гг. наблюдался тренд увеличения уровня озера на 1–1.5 м с соответствующей трансформацией береговой зоны [1].

Продолжают оставаться в центре внимания проблемы качества и эвтрофикации вод озера. В последние десятилетия характер природопользования в бассейне оз. Ханка изменился. Это оказало положительное влияние на экосистемы речных водосборов и качество озерных вод. В частности, по сравнению с 80–90 гг. прошлого века концентрации общего растворенного фосфора снизились в озерных водах практически в 2 раза, произошло изменение соотношения форм аммонийного и нитратного азота в сторону преобладания

нитратной формы [4, 10]. В китайском секторе водосборной территории озера Ханка также наметились положительные тенденции: фиксируются тренды снижения уровня эвтрофикации [11, 12].

По данным, полученным с использованием дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий, была создана карта землепользования в трансграничном бассейне оз. Ханка [13]. Основная часть (более 90 %) рисовых полей на территории РФ расположена в Хорольском, Спасском, Ханкайском и Черниговском муниципальных районах. При этом площадь рисовых полей на российской части бассейна почти в 3 раза меньше, чем на китайской.

Очевидно, что в отличие от изменения уровня воды, которое контролируется процессами с характерным временем более года [14], характеристика качества вод требует информации как минимум о сезонной изменчивости химического состава. Отсутствие опубликованных данных такого рода являлось основной причиной инициации представляемого исследования. Поскольку эвтрофикация – это одна из основных экологических проблем оз. Ханка, данные о концентрации в водах биогенных веществ (растворенного органического углерода (РОУ), соединений фосфора, азота, кремния) наряду с общими гидрохимическими показателями находились в центре внимания работы.

Растворенный органический углерод является неотъемлемым компонентом природных вод и участником глобального цикла углерода. РОУ представляет собой комплекс органических соединений аллохтонного и автохтонного происхождения, среди них – специфические гуминовые вещества и неспецифические соединения – аминокислоты, белки, моно- и полисахариды, органические кислоты, фенолы и др. РОУ играет важную роль в химии и экологии поверхностных вод, оказывая влияние на их кислотно-основные свойства, перенос и трансформацию биогенных элементов и микроэлементов, а также на световой режим и метаболизм водных организмов. Как и твердое органическое вещество почв, РОУ из-за своей сложности остается недостаточно изученным таксоном, но интерес к его исследованию растет благодаря тому, что, являясь одним из наиболее динамичных компонентов экосистем, он служит чувствительным индикатором изменений в экологических процессах [15].

Углерод, склонный к полимеризации, в биомолекулах связан с водородом, кислородом, азотом, фосфором, серой и микроэлементами. Физиологическая роль углерода в организмах определяется тем, что он входит в состав всех органических соединений и принимает участие во многих биохимических реакциях.

По сравнению с органическим углеродом, азот характеризуется более коротким биогеохимическим циклом и отличается несколькими степенями окисления (от -3 до +5). Азот принимает участие в построении молекулы хлорофилла. Фосфор вместе с азотом и углеродом входят в состав белков, нуклеиновых кислот, нуклеотидов, фосфолипидов и образуют структуру АТФ и АДФ, ДНК и РНК. Растворимые соли фосфорной кислоты формируют фосфатную буферную систему, ответственную за постоянство кислотно-щелочного равновесия внутриклеточной жидкости. Кремний жизненно необходим некоторым распространенным видам фитопланктона (диатомовым).

Цель настоящего исследования – изучить сезонную и пространственную изменчивость концентраций РОУ (включая качественный состав по спектральным индексам), а также концентрации биогенных элементов (Si, P, N) в озерных и речных водах бассейна оз. Ханка и выявить факторы, определяющие сезонную вариабельность этих параметров.

Материалы и методы

Пробы воды отбирали из поверхностного (0.3 м) слоя воды с января по ноябрь 2025 г. в нижнем течении рек Спасовка, Илистая, Мельгуновка, Комиссаровка, а также на трех точках в прибрежной зоне юго-восточной, западной и северо-западной частях оз.

Ханка (рис. 1). Кроме того, в июле было отобрано 7 проб в центральной части озера. В январе и феврале озеро полностью было покрыто плотным, преимущественно ровным льдом, толщина которого в западной и северо-западной частях озера составляла 90–92 см, в восточной – 110 см. Снежный покров на поверхности льда в эти месяцы не был сплошным в силу сильного ветрового переноса, высота его находилась в пределах 15–20 см. На реках ледовая обстановка в начале года сильно отличалась. В устьевой зоне р. Спасовка толщина льда достигала 90–95 см, в реках Илистая и Мельгуновка – 80 см, а в низовьях р. Комиссаровка на перекатах из-за больших скоростей течения наблюдались многочисленные полыньи. В марте отбор проб не проводился в связи с ледоходом и таянием озерного льда.

При отборе проб с помощью зонда Aquaread 5000 определяли in-situ температуру, pH и электропроводность (ЕС) как меру общей минерализации. В лаборатории в нефитрированных пробах оценивали общую щелочность методом потенциометрического титрования по стандартной методике. Пробы фильтровали под вакуумом через мембранные фильтры Millipore PVDF с диаметром пор 0.45 мкм. Полученные фильтраты использовали для дальнейшего анализа.

Концентрацию макрокатионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), а также общий растворенный кремний и общий растворенный фосфор анализировали методом ИСП-ОЭС на приборе Plasma 3000 NCS в подкисленной аликвоте. Содержание хлоридов, сульфатов и нитратов

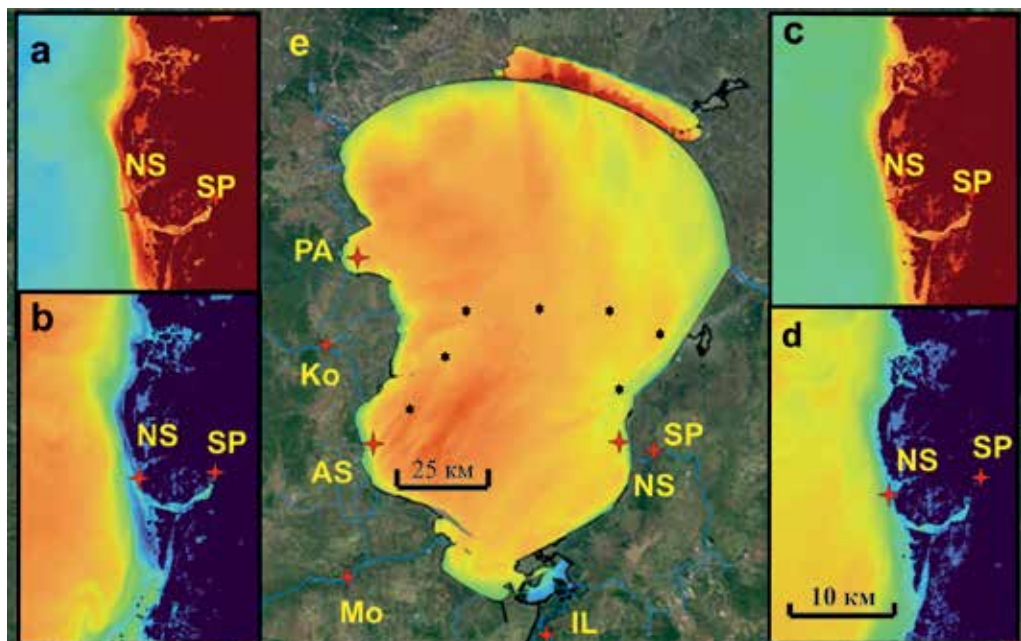


Рис. 1. Схема расположения станций сезонного мониторинга химического состава вод бассейна оз. Ханка в 2025 г. на фоне распределения индекса NDWI, рассчитанного по композиту снимка Landsat 8 от 30.05.2025; SP – р. Спасовка, IL – р. Илистая, Mo – р. Мельгуновка, Ko – р. Комиссаровка, NS – юго-восточное побережье оз. Ханка, AS – западное побережье (п. Астраханка), PA – северо-западное побережье (п. Платоново-Александровское), черные точки – места отбора вод озера 29.07.2025; (a) – распределение хлорофилла «а» и (b) – взвешенного вещества в юго-восточном побережье оз. Ханка со снимка Landsat 8 от 30.05.2025; (c) и (d) – то же самое, но со снимка Landsat 9 от 27.09.2025 г.

Fig. 1. Stations layout for seasonal water chemistry monitoring in the Lake Khanka basin (2025), overlaid with NDWI distribution from a Landsat 8 composite (30.05.2025). SP: Spasovka River; IL: Ilistaya River; Mo: Mel'gunovka River; Ko: Komissarovka River; NS: southeastern lakeshore; AS: western lakeshore (Astrakhanka); PA: northwestern lakeshore (Platonovo-Aleksandrovskoe). Black symbols: lake water sampling sites (29.07.2025). (a) – Chlorophyll “a” and (b) – suspended matter distribution in the southeastern lakeshore (Landsat 8, 30.05.2025); (c) and (d) the same parameters from (Landsat 9, 27.09.2025)

определяли методом ионной хроматографии с использованием прибора Shimadzu LC-10. Концентрацию фосфатов (P-PO₄) определяли спектрофотометрическим методом с молибдатом аммония.

Растворенный органический углерод анализировали методом каталитического сжигания с ИК-регистрацией на анализаторе TOC-Vcpn (Shimadzu) в режиме невыдуваемого органического углерода (NPOC). Для характеристики химической природы РОУ записывали спектры поглощения фильтратов в кварцевой кювете 1 см в интервале 200–800 нм на двухлучевом спектрофотометре UV-2450 (Shimadzu). Рассчитывали спектральные индексы SUVA₂₅₄ (specific ultraviolet absorbance) [16] и E₂₅₀/E₃₆₅ (E₂/E₃) [17].

Химико-аналитические исследования проведены в ЦКП ТИГ ДВО РАН.

Результаты и обсуждение

Общие гидрохимические показатели изучаемых вод приведены в табл. 1. Все воды бассейна оз. Ханка являются нейтральными или слабощелочными, гидрокарбонатно-магниево-кальциевыми, ультрапресными с минерализацией в диапазоне 50–200 мг/л. Исключение составляет р. Илистая, в которой наблюдалось изменение типа вод с гидрокарбонатного на сульфатно-гидрокарбонатный. По возрастанию минерализации реки образуют устойчивый ряд: р. Комиссаровка – р. Мельгуновка – р. Илистая – р. Спасовка в соответствии с увеличением антропогенной нагрузки, возрастанием роли сельскохозяйственных и уменьшением роли лесных ландшафтов [18]. Сезонная изменчивость минерализации во всех реках однотипна и соответствует наблюдаемой в других реках региона: максимум зимой за счет увеличения доли почвенных и грунтовых вод при минимальном водном стоке, минимум в апрельское половодье за счет талых вод и повышение летом и осенью при очевидной обратной связи с водным режимом (рис. 2, а). Минерализация озерных вод, в отличие от речных, практически не меняется в течение года и соответствует средневзвешенному значению минерализации речных вод (рис. 2, а).

Таблица 1

Общая гидрохимическая характеристика вод
Table 1. Basic hydrochemical parameters of waters

Объекты	pH	ЕС мкС/см	Σионов, мг/л	Формула Курлова
Р. Комиссаровка, n = 10	6.80 ± 0.2	84 ± 20	61 ± 15	$\frac{Ca^{2+}49 Mg^{2+}28 [Na^{+}18 K^{+}3]}{HCO_3^{-}78 [SO_4^{2-}13 Cl^{-}5 NO_3^{-}4]}$
Р. Мельгуновка, n = 10	6.9 ± 0.3	119 ± 33	84 ± 26	$\frac{Ca^{2+}46 Mg^{2+}28 [Na^{+}22 K^{+}4]}{HCO_3^{-}78 [SO_4^{2-}10 Cl^{-}10 NO_3^{-}2]}$
Р. Илистая, n = 10	6.80 ± 0.2	170 ± 61	116 ± 44	$\frac{Ca^{2+}51 Mg^{2+}27 [Na^{+}18 K^{+}4]}{HCO_3^{-}61 SO_4^{2-}29 [Cl^{-}8 NO_3^{-}2]}$
Р. Спасовка, n = 10	7.05 ± 0.2	218 ± 62	152 ± 44	$\frac{Ca^{2+}54 [Mg^{2+}24 Na^{+}18 K^{+}4]}{HCO_3^{-}72 [SO_4^{2-}13 Cl^{-}13 NO_3^{-}2]}$
Оз. Ханка*, n = 26	7.67 ± 0.74	152 ± 14	103 ± 11	$\frac{Ca^{2+}46 Mg^{2+}27 [Na^{+}21 K^{+}6]}{HCO_3^{-}67 [SO_4^{2-}17 Cl^{-}15 NO_3^{-}1]}$
Оз. Ханка**, n = 9	7.21 ± 0.35	149 ± 32	105 ± 24	$\frac{Ca^{2+}50 Mg^{2+}26 [Na^{+}18 K^{+}6]}{HCO_3^{-}76 [Cl^{-}13 SO_4^{2-}11 NO_3^{-}0]}$

Здесь и в табл. 2: * северо-западное (с. Платоно-Александровское) и западное побережье оз. Ханка (с. Астраханка); ** юго-восточное побережье оз. Ханка (с. Новосельское)

Растворенный органический углерод

По наблюдениям 2025 г. концентрация РОУ в речных водах составляла 1.8–8.9 мгС/л (рис. 2, табл. 2), при среднем 4.22 ± 1.87 мгС/л ($n = 41$), что близко среднему 5 мгС/л для незагрязненных рек мира [19]. Для концентрации РОУ в реках наблюдается выраженная сезонность. Зимой, когда реки питаются водами глубоких почвенных горизонтов, концентрации РОУ минимальны: 2–3 мгС/л, в теплый сезон концентрации возрастают до 4–9 мгС/л в половодье (апрель) и особенно в периоды циклонических осадков в августе–сентябре.

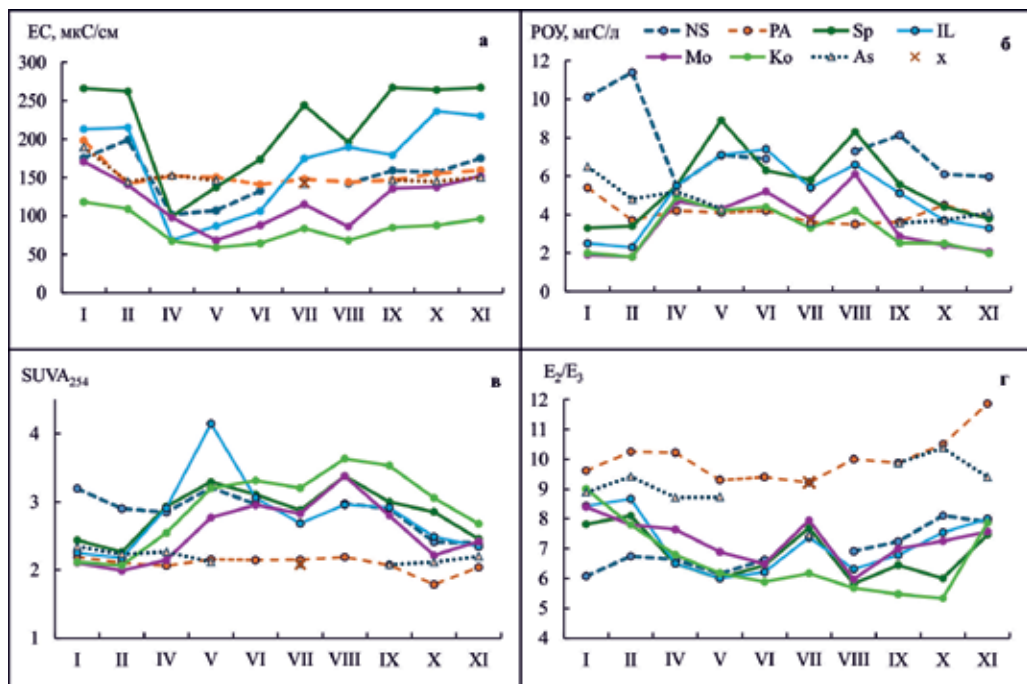


Рис. 2. Сезонное изменение минерализации, мкС/см (а), концентрации РОУ, мгС/л (б), показателей $SUVA_{254}$ (в) и E_2/E_3 (г) в реках и в самом оз. Ханка в 2025 г. Здесь и на рис. 3: NS – юго-восточное побережье, PA – северо-западное побережье, Платоно-Александровское, As – западное побережье, Астраханка, Sp – р. Спассовка, IL – р. Иллистая, Mo – р. Мельгуновка, Ko – р. Комиссаровка, x – открытая часть озера

Fig. 2. Seasonal variation of (a) mineralization ($\mu\text{S}/\text{cm}$), (б) DOC concentration (mgC/L), (в) $SUVA_{254}$ values, and (г) E_2/E_3 ratios in the rivers and Lake Khanka in 2025. For location symbols, see Fig. 1

Почвы как главный источник терригенного органического вещества (ОВ) представляют собой важнейший фактор при формировании потоков ОВ в речную гидросеть [19]. Наибольшей потенциальной способностью поставлять высокие концентрации РОУ отличаются торфяно-болотные и лугово-болотные почвы, для которых типично высокое содержание органического вещества гумусовой природы. Возможно поэтому концентрация РОУ в реках Иллистая и Спассовка выше, чем в р. Мельгуновка, и особенно в р. Комиссаровка, на водосборе которых преобладают горнолесные ландшафты [18]. Подробная информация об основных типах ландшафтов и почв бассейна оз. Ханка представлена на Почвенной карте (1 : 500000) и в пояснительной записке Г.И. Иванова [20]. Согласно автору, почвы бассейна р. Комиссаровка функционируют в ландшафтах быстрого и сдержанного водообмена. При значительных уклонах и высокой дренируемости горно-лесных почв Приморья время контакта склоновых вод с почвами минимально, поэтому концентрации РОУ в водах р. Комиссаровка в теплое время года самые низкие среди рек: 3–4 мгС/л (рис. 2, б).

Таблица 2

Содержание биогенных элементов, РОУ и его спектральные показатели в водах бассейна оз. Ханка

Table 2. Concentrations of biogenic elements, dissolved organic carbon (DOC), and associated spectral indices in the Lake Khanka basin waters.

Объект	РОУ, мгС/л	P _{общ.} , мкг/л	P-PO ₄ , мкг/л	N-NO ₃ , мг/л	Si, мг/л	SUVA ₂₅₄	E ₂ /E ₃
Р. Комиссаровка, n = 10	3.1 ± 1.2	15.3 ± 9.8	10.1 ± 7.0	0.33 ± 0.51	6.7 ± 1.0	2.9 ± 0.5	6.6 ± 1.2
Р. Мельгуновка, n = 10	3.5 ± 1.5	11.8 ± 10.5	5.3 ± 4.7	0.21 ± 0.23	5.5 ± 1.3	2.6 ± 0.5	7.3 ± 0.7
Р. Илистая, n = 10	4.9 ± 1.9	18.6 ± 11.5	6.3 ± 6.8	0.38 ± 0.18	6.0 ± 1.6	2.8 ± 0.6	7.2 ± 1.0
Р. Спасовка, n = 10	5.5 ± 1.9	28.1 ± 18	16.4 ± 13.4	0.75 ± 0.23	5.7 ± 1.4	2.9 ± 0.4	6.8 ± 0.9
Оз. Ханка*, n = 26	4.2 ± 0.8	58.5 ± 28.5	56.3 ± 30.6	0.21 ± 0.12	3.8 ± 0.9	2.1 ± 0.1	9.6 ± 0.9
Оз. Ханка**, n = 9	7.6 ± 2.0	6.5 ± 4.1	1.0 ± 0.7	0.07 ± 0.08	1.3 ± 0.7	2.9 ± 0.3	6.9 ± 0.7

В бассейне р. Мельгуновка сравнительно большую территорию занимают ландшафты плоских низких приозерных и речных террас с массивами и участками быстрого и затрудненного водообмена с застойным режимом. Бассейн выделяется большими с/х площадями, освоенными под овощные культуры и рисосеяние. Диапазон концентраций РОУ в течение года здесь 4–6 мгС/л, пик весеннего снеготаяния, как и для бассейна р. Комиссаровка, выражен слабо, но, в отличие от нее, наблюдается высоководный августовский максимум (рис. 2, б).

На самом крупном из рассматриваемых, водосборе р. Илистая, ряд типов дренируемых ландшафтов и почв расширяется, при этом меняется их соотношение в сторону более равнинных и гидроморфных [20]. В этом бассейне самые большие площади отведены для сельскохозяйственного производства. Соответственно повышается и уровень концентраций РОУ в точке отбора на р. Илистая (рис. 2, б).

Водосбор р. Спасовка – это самый густонаселенный, промышленно- и сельскохозяйственно-развитый район, он находится на юго-восточном побережье оз. Ханка, здесь самая большая доля ландшафтов с застойным водным режимом и вариантами торфяно-глеевых и дерново-торфянисто-глеевых почв [20]. Видимо, поэтому сезонная динамика распределения концентраций РОУ является наиболее выраженной по сравнению с другими реками, а уровень содержания РОУ в р. Спасовка выше, чем в других реках (рис. 2, б).

Таким образом, основным фактором, от которого зависит концентрация РОУ в речных водах бассейна оз. Ханка, является почвенный покров, который определяет запас углерода, способного к мобилизации. Хозяйственное освоение территории прямо или косвенно также может влиять на содержание подвижного углерода в почвах и грунтах. Однако непосредственным фактором, контролирующим мобилизацию из почв и концентрации РОУ в речных водах, выступает водный режим. Следует отметить также влияние такого локального фактора, как рельеф, действующий на мобилизацию РОУ через соотношение площадей горно-лесных и равнинных ландшафтов, присущих им типов почв и вариантов увлажнения. Закономерно, что по мере того, как выполаживаются долины рек, увеличивается их антропогенная освоенность. Известно, что в процессе землепользования из-за многократной механической обработки почвы и изъятия с/х продукции разрушается естественный биокруговорот углерода, и это приводит к постепенному снижению его содержания в почвах, данный фактор также воздействует и на концентрации РОУ, поскольку жидкая фаза стремится к равновесию с твердой [21].

В отличие от рек, где преобладает аллохтонное (педогенное) РОУ, в озерах, включая оз. Ханка, основным источником РОУ является автохтонная продукция фитопланктона [2, 22]. Содержание РОУ в водах оз. Ханка достаточно стабильно в течение года. Лишь в январе наблюдается незначительно (в 1.3–1.5 раза) повышенное его содержание (рис. 2, б). Юго-восточное побережье оз. Ханка по концентрации РОУ, как и по содержанию дру-

гих биогенных элементов, значительно отличается от остального озера. Весной и летом содержание РОУ в юго-восточном побережье озера близко к таковому в р. Спасовка, но зимой и осенью в 1.5–3 раза выше, в феврале достигает максимальной концентрации 11.4 мгС/л.

Помимо общего содержания растворенного органического вещества, отражаемого концентрацией РОУ, важное значение имеет его качественный состав и свойства, для характеристики которых разработан комплекс показателей [16, 17]. Одним из таких показателей является $SUVA_{254}$ – величина отношения поглощения света при 254 нм к содержанию РОУ (л/мг·м). Высокое значение $SUVA_{254}$ (>4) указывает на преобладание структур ароматических соединений почвенно-растительного происхождения в составе РОУ, а пониженная величина – на относительное доминирование продуктов метаболизма гидробионтов и микроорганизмов, представленных углеводами, в том числе полисахаридами [23].

Для рек бассейна оз. Ханка характерен весьма узкий диапазон значения $SUVA_{254}$ в пределах отдельно взятого опробования (см. рис. 2, в, табл. 2). Исключение представляет р. Илистая в мае, когда ароматичность РОУ аномально возрастает, по-видимому, за счет мобилизации РОУ из почв сырых лугов и болот, покрывающих большую территорию поймы р. Илистая в ее среднем и нижнем течении. В то же время общий тренд сезонности показателя $SUVA_{254}$ в реках бассейна оз. Ханка очевиден и значим: минимальная ароматичность РОУ наблюдается зимой и поздней осенью на фоне снижения общего содержания РОУ, в это время состав вод формируется за счет стока из глубоких почвенных горизонтов с минимальным содержанием гумусовых соединений. Повышенная ароматичность характерна для теплого времени года, когда обильные осадки выносят РОУ из гумусовых горизонтов почв (рис. 2, в).

Величина $SUVA_{254}$ в водах основной части озера находится на уровне 1.8–2.2 л/мг·м в течение всего года, т.е. на минимальном уровне, наблюдаемом в питающих его реках зимой. Очевидно, это может свидетельствовать о том, что автохтонное растворенное органическое вещество, продуцируемое в самом озере, содержит соединения РОУ с преобладанием углеводов и/или о достаточно глубокой и эффективной бактериальной деструкции аллохтонного РОУ, поступающего в озеро с речным стоком, что согласуется с данными В.В. Бульона [22] о деятельности специализированных деструкторов аллохтонного РОУ в озерных водах.

Показатель $SUVA_{254}$ в озерных водах юго-восточного побережья значительно выше, чем в остальной части озера, и находится на уровне, наблюдаемом в реках. Более того, в зимнее время $SUVA_{254}$ в юго-восточном побережье даже выше, чем в реках, в том числе в р. Спасовка (рис. 2, в). В сочетании с самой высокой концентрацией РОУ в этой части озера зимой это может указывать на дополнительное поступление растворенного органического вещества с высокой долей ароматических соединений в составе РОУ, вероятно, из заболоченных ландшафтов полуразрушенных мелиоративных систем устьевой зоны р. Спасовка. Именно устьевой, поскольку влияние мелиоративных систем нижнего течения р. Спасовка учитывалось нами отбором проб из данной реки в с. Новосельское.

Аналогичные и характерные величины $SUVA_{254}$, варьирующие от 1.60 до 4.96 л/мг·м, были получены ранее для малых озер – оз. Благодати, оз. Голубичное Сихотэ-Алинского заповедника и оз. Васьковское Дальнегогорского района Приморского края, а также для соответствующих питающих их рек и ручьев [24]. Как и для вод оз. Ханка, РОУ рек и ручьев, питающих эти малые озера, по химической природе является более ароматичным, гумусированным по сравнению с автохтонным РОУ озерных экосистем, где преобладают углеводы [23].

Обратным показателем $SUVA_{254}$ является отношение E_{250}/E_{365} (E_2/E_3), также характеризующее вклад ароматических гумусовых и углеводных соединений в молекулярную структуру РОУ, но оно не зависит от концентрации РОУ. Данным соотношением пользуются для отслеживания изменений относительного размера макромолекул РОУ. Когда растет

молекулярный вес, E_2/E_3 падает, поскольку высокомолекулярные фракции, представленные гумусовыми соединениями, сильнее поглощают свет при больших длинах волн [17]. Соответственно величина показателя E_2/E_3 в открытой части оз. Ханка и в прибрежье за пределами прямого влияния речного стока повышена до 9.5–11.5, в юго-восточном прибрежье, находящемся под очевидным влиянием стока р. Спасовка, снижается до 8–9, а в речных водах до 6–8 (см. рис. 2, г; табл. 2).

Кремний

Кремний, несмотря на то, что он является литофильным элементом, поступающим в природные воды преимущественно из пород, является критически важным для диатомовых водорослей. При высокой продуктивности водоемов происходит его активное потребление [25]. В речных водах бассейна озера концентрация растворенного кремния составляет 6.0 ± 1.4 мг/л. В целом сезонная динамика кремния в реках близка к таковой для минерализации (рис. 2, а и 3, а, табл. 2).

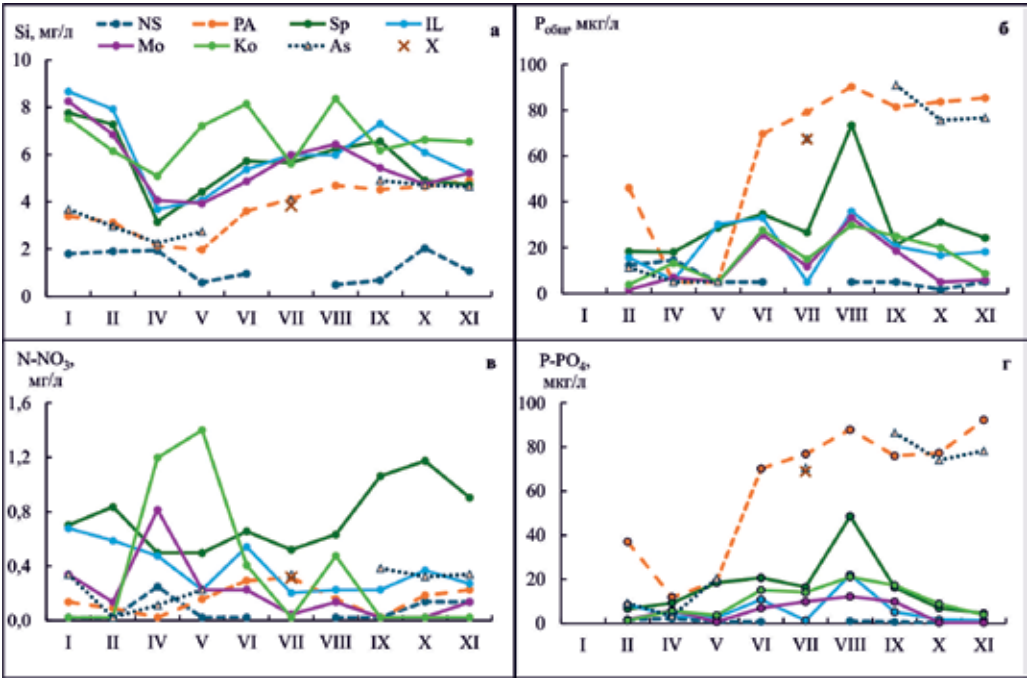


Рис. 3. Сезонная изменчивость концентраций биогенных элементов в оз. Ханка и в реках его бассейна в 2025 г. (а) – кремний общий растворенный (Si), мг/л, (б) фосфор общий растворенный (Р_{общ}), мкг/л, (в) – азот нитратов (N-NO₃), мг/л, (г) – фосфор фосфатов (P-PO₄) мкг/л

Fig. 3. Seasonal variability of biogenic element concentrations in Lake Khanka and the rivers of its basin in 2025: (а) total dissolved silicon (Si, mg/L), (б) total dissolved phosphorus (P, µg/L), (в) nitrate nitrogen (N-NO₃, mg/L), (г) phosphate phosphorus (P-PO₄, µg/L)

Зимой, в подледный период, фиксируется максимум концентрации, вероятно, из-за снижения водности и более сильного влияния разгрузки подземных вод. Весной, во время половодья, происходит разбавление талыми вод, что сопровождается снижением концентраций. Летом и осенью отмечается рост содержания кремния, обусловленный поступлением его с поверхностным стоком с водосбора. При этом максимальные концентрации Si (до 8.4 мг/л) зафиксированы в летний период в р. Комиссаровка (рис. 3, а), что свидетельствует о повышенной роли горнолесных ландшафтов в поставке растворенного кремния в речной сток в теплое время года. Однако во всех остальных реках концентрация растворенного кремния практически одинакова, хотя сезонные изменения очевидны (рис. 3, а).

В озерных водах средняя концентрация растворенного кремния ниже, чем в реках, — 3.8 ± 0.9 мг/л. Потребление диатомовым фитопланктоном – наиболее вероятная причина. При этом в юго-восточной прибрежной зоне фиксируется особенно заметное снижение содержания растворенных силикатов до 1.3 ± 0.7 мгSi/л. Учитывая повышенную концентрацию растворенного Si в поступающих сюда речных водах до 4–7 мгSi/л, и то, что юго-восточное побережье находится под очевидным большим влиянием речного стока по сравнению с основной акваторией озера, это свидетельствует об особенно активном потреблении здесь кремния диатомовым фитопланктоном. Это подтверждается и данными дистанционного зондирования, отражающими повышенное содержание Chl”a” в юго-восточном побережье (рис. 1, а, с).

Сезонная динамика растворенного кремния в озере повторяет тренды для речных вод (снижение весной, рост летом и осенью), но с меньшими амплитудами колебаний (рис. 3а). Это обусловлено увеличением поступления растворенного Si с речным стоком в теплый период. Кроме того, в озере в течение лета наблюдается изменение доминирующих видов фитопланктона от диатомовых к синезеленым водорослям [26], что очевидно сопровождается уменьшенным потреблением растворенного Si и увеличением его концентрации в воде.

Фосфор

Среднее за год содержание $P_{\text{общ.}}$ и $P\text{-}PO_4$ в реках бассейна оз. Ханка составляет 18.5 ± 13.8 и 9.5 ± 9.3 мкг/л соответственно (см. табл. 2). Повышенная концентрация характерна для р. Спасовка, что связано, вероятно, с максимальной антропогенной нагрузкой [7]. В остальных реках уровень содержания фосфатов близок в пределах отдельных опробований. Однако сезонная изменчивость концентрации и фосфатов и общего растворенного фосфора в реках выражена однозначно: повышенная концентрация растворенных форм фосфора наблюдалась в теплый период с максимумами во время летних муссонных дождей (рис. 3, б, в). Зимой и поздней осенью имеет место 2–4-кратное снижение уровней растворенного фосфора в реках, что обусловлено уменьшением интенсивности биогеохимических процессов и соответственно меньшим поступлением с водосборного бассейна. Поскольку весеннее половодье с максимальными расходами воды не сопровождается значительными изменениями концентрации растворенных форм фосфора (рис. 3, б, в), можно предположить, что в отличие от ионов макросостава и PO_4 , для которых водный сток являлся главным контролирующим фактором, концентрация растворенных форм фосфора в речных водах бассейна оз. Ханка зависит больше от интенсивности биогеохимических процессов их мобилизации на водосборе.

В озере содержание $P_{\text{общ.}}$ и $P\text{-}PO_4$ весьма изменчиво и составляет в среднем 58.5 ± 28.5 и 56.3 ± 30.6 мкг/л соответственно (табл. 2). При этом, как и в случае с кремнием, наблюдается пространственная неоднородность. Крайне низкие концентрации как общего, так и минерального фосфора в юго-восточном побережье озера (5–15 и 1–2 мкг/л соответственно) подтверждают предположение об аномально высоком уровне первичной продукции на этом участке, как и в случае с кремнием.

Значительное превышение концентраций фосфора в основной водной массе озера Ханка по сравнению с реками (в 2–4 раза летом и осенью) объясняется аккумуляцией биогенных элементов в водоеме, внутриводоемными процессами, сезонным развитием фитопланктона и его последующим отмиранием, а также возможным потоком фосфатов из донных отложений. По данным Савенко [27], значительная часть фосфора (до 50–80 %) может находиться во взвеси и в донных отложениях.

Соотношение растворенных форм фосфора отражает особенности круговорота элемента в разных водных объектах. В реках доля минеральной формы фосфора от общего варьируется в широких пределах — 5–95 % (в среднем около 45 %). Такая высокая вариабельность связана с различиями в гидрологических условиях и антропогенной нагрузке. В основной части озера доля минеральной формы ($P\text{-}PO_4$) от общего ($P_{\text{общ.}}$) возрастает

до 60–95 % (в среднем около 70 %). Это указывает на активную трансформацию органических веществ: быструю минерализацию органических соединений фосфора и эффективный обмен между растворенными и взвешенными формами. Исключением является юго-восточный участок озера, где концентрации фосфора гораздо ниже и наблюдается тенденция к преобладанию органических форм. Высокие летние концентрации общего фосфора в основной части озера (до 90 мкг/л) свидетельствуют о развитии эвтрофикации в этот период. Это может проявляться в массовом размножении фитопланктона, снижении прозрачности воды и дефиците кислорода в придонных слоях. Выявленные закономерности распределения и сезонной динамики растворенного фосфора подчеркивают сложность биогеохимических процессов в акватории оз. Ханка и необходимость комплексного подхода и учета роли донных отложений и взвешенных частиц в его круговороте.

Азот нитратов

В реках бассейна оз. Ханка наблюдаются заметные различия в концентрации нитратного азота и выраженная сезонная динамика (рис. 3, в). Река Спасовка характеризуется наиболее высокими уровнями нитратов с годовым диапазоном 0.5–1.2 мг (0.8 ± 0.2 мгN/л). Зимой концентрация составляет 0.7–0.8 мгN/л из-за замедления биотических процессов и, возможно, снижения водности. Весной, в период половодья (апрель–май), уровень снижается до 0.5 мгN/л за счет разбавления талыми водами. Осенью фиксируется пик до 1.1–1.2 мг N/л, что может свидетельствовать о разложении органического вещества и дополнительной антропогенной нагрузке. Реки Комиссаровка и Мельгуновка характеризуются более низкими концентрациями: годовой диапазон составляет 0.02–1.4 мгN/л и 0.02–0.8 мгN/л соответственно. Характерной особенностью сезонной динамики нитратов в р. Комиссаровка, и в меньшей степени в р. Мельгуновка, является весенний максимум (апрель–май), который, вероятно, вызван вымыванием минеральных азотных соединений из почвы при таянии снега. Это характерно для относительно чистых водотоков с низким уровнем антропогенного воздействия. В остальное время года уровень нитратов здесь существенно ниже, чем в р. Спасовка, что может быть связано с преобладанием лесных экосистем на водосборах [7]. Река Илистая занимает промежуточное положение с диапазоном нитратного азота 0.2–0.7 мгN/л. Зимой отмечаются концентрации до 0.6–0.7 мгN/л — вероятно, из-за снижения стока и накопления минеральных форм азота. Во время весеннего половодья уровень снижается до 0.2–0.5 мг N/л за счет разбавления. После половодья концентрация остается стабильно низкой, без выраженного осеннего роста.

В водах оз. Ханка уровень концентрации нитратного азота соответствует минимальному, наблюдаемому в р. Мельгуновка (см. табл. 2, рис. 3в). В исследованных прибрежных зонах годовой диапазон составляет 0.02–0.4 мгN/л. Как и по другим биогенным веществам, выделяется юго-восточное побережье, находящееся под влиянием стока р. Спасовка. Здесь концентрация нитратного азота находится на минимальном уровне 0.02 мгN/л практически круглый год. В сочетании с повышенным уровнем нитратов в р. Спасовка (рис. 3в) это свидетельствует о высоком ассимиляционном потенциале устьевых зон рек, впадающих в оз. Ханка. Сезонная изменчивость концентрации нитратного азота в озере слабо выражена и не однозначна. Очевидно, что для комплексной оценки трофического статуса водоема необходимо дополнительное изучение других форм азота — аммонийного и органического, чтобы получить полную картину биогенной нагрузки и потенциальных рисков эвтрофикации.

Заключение

Сезонный мониторинг гидрохимии речных вод, выполненный в 2025 г. на основных четырех реках, питающих оз. Ханка, показал, что состав вод каждой реки отражает ландшафтные особенности ее водосбора. По увеличению минерализации и степени

антропогенной нагрузки реки образуют ряд: Комиссаровка–Мельгуновка–Илистая–Спасовка. В этом же ряду возрастает контрастность сезонных изменений минерализации и концентрации макроионов. При этом характер сезонной динамики этих показателей был одинаков: максимум зимой, минимум в весеннее половодье, постепенное возрастание летом и осенью с сезонным коэффициентом вариации 25–35 %. Воды рек сохраняли гидрокарбонатно-кальциевый ультрапресный тип минерализации. Исключение составляла р. Илистая, имевшая гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевый тип вод. Озерные воды также имели гидрокарбонатно-кальциевый состав, но, в отличие от рек, сезонный коэффициент вариации минерализации и макросостава в оз. Ханка не превышал 10–12 %, т.е. сезонная изменчивость речного стока практически не влияла на состав основной водной массы озера. Лишь в юго-восточном побережье, находящемся под прямым влиянием стока р. Спасовка, сезонный коэффициент вариации минерализации возрастал до 24 % за счет зимний межени и весеннего половодья.

Круглогодичные исследования концентраций РОУ в реках бассейна оз. Ханка показали, что их сезонная и пространственная изменчивость достаточно выражена и определяется водным режимом, типичным для муссонного климата юга Дальнего Востока. Водосборы рек различаются по скорости водообмена, представляя ряд сочетаний ландшафтов быстрого и сдержанного водообмена (западная часть бассейна оз. Ханка) с ландшафтами застойного водного режима (южная и юго-восточная часть бассейна). В результате уровень концентрации РОУ в реках Комиссаровка и Мельгуновка в 1.5 раза ниже, чем в реках Илистая и Спасовка, хотя характер сезонной изменчивости РОУ во всех реках одинаков: минимум зимой и поздней осенью и увеличение в 2–3 раза летом. Повышенное значение показателя $SUVA_{254}$ в теплое время года отражает доминирование гумусовых педогенных соединений в составе РОУ рек бассейна оз. Ханка.

В отличие от рек, концентрация РОУ озерных вод в западном побережье достаточно стабильна в течение года и составляет 5–7 мгС/л, что превышает зимний уровень в реках, но ниже, чем летом. Величина $SUVA_{254}$ (1.8–2.2 л/мг*м) и равномерное пространственно-временное распределение этого показателя свидетельствуют о существенном вкладе автохтонного РОУ, представленного преимущественно водорастворимыми углеводами. Воды юго-восточного побережья озера отличаются своими круглогодно более высокими концентрациями РОУ (6–11 мгС/л) и динамикой показателя $SUVA_{254}$, характеризующей присутствие здесь РОУ ароматической природы, источником которого, вероятно, являются торфяно-болотные почвы Приханкайской низменности.

Биогенные элементы, в отличие от минерализации и макроионов, демонстрируют различное распределение в реках и в самом озере. В реках концентрация растворенного Si контролируется преимущественно водным режимом и в меньшей степени процессами на водосборах. Для фосфора, напротив, определяющим является сезонное (летнее) усиление мобилизационных процессов на водосборах, с подчиненным влиянием водного режима. Для нитратного азота роль ландшафтов на водосборе и водного режима меняется от реки к реке. В озере главными факторами, контролирующими сезонную и пространственную изменчивость концентрации биогенных элементов, являются внутриводоемные процессы: биоассимиляция Si фитопланктоном зимой и весной и мобилизация фосфора в раствор из взвеси и донных отложений летом и осенью.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ: грант «Трансформация гидрологического режима и ее экологическое воздействие на российско-китайскую трансграничную геосистему оз. Ханка в условиях изменения окружающей среды» (№ 25-47-00022). Авторы выражают благодарность С.В. Катрасову, к.г.н., научному сотруднику лаборатории моделирования динамики геосистем ТИГ ДВО РАН за предоставление спутниковых данных.

Acknowledgments. The work was carried out with the financial support of the Russian National Research for Foundation grant 25-47-00022 “Transformation of the hydrological regime and its environmental impact on the Russian-Chinese transboundary geosystem of Lake Khanka in a changing environment”. The authors would like to thank Katrasov S.V., PhD, candidate of geographical sciences, research associate of the Laboratory of the geosystems modeling dynamics of the TIG FEB RAS for providing the satellite data.

Литература

1. Бакланов П.Я., Качур А.Н., Ермошин В.В., Коженкова С.И., Махинов А.Н., Бугаец А.Н., Базарова В.Б., Ким В.И., Шамов В.В. Современные геоэкологические проблемы в бассейне озера Ханка // География и природные ресурсы. 2019. № 4 (158). С. 33–43.
2. Щур Л.А., Бондаренко Н.А. Сравнительный анализ фитопланктона озер Байкал и Ханка // Гидробиологический журнал. 2012. Т. 48, № 1. С. 16–26.
3. Афонасенко А.Д., Лопатин В.Н., Щур Л.А., Филимонов В.С., Назаров В.А. Современное состояние озера Ханка по некоторым гидробиологическим и гидрофизическим показателям // Изв. ТИНРО. 2000. Т. 127. С. 535–558.
4. Чудаева В.А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2002. 392 с.
5. Матвеев В.И., Курносова (Важнова) А.С., Катайкина О.И. Результаты гидрохимического мониторинга озера Ханка в 2016–2018 годах // Тихоокеанская география. 2020. № 3. С. 47–55.
6. Катайкина О.И., Матвеев В.И., Фигуркин А.Л. Гидрологическая и гидрохимическая характеристика юго-западной части озера Ханка в зимний период 2016 г. – 2023 г. // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 699–710.
7. Коженкова С.И., Юрченко С.Г., Базаров К.Ю. Биогенные вещества в реках водосборного бассейна озера Ханка // Тихоокеанская география. 2024. № 2. С. 107–119.
8. Kurnosova A.S., Matveev V.I., Kataykina O.I. Trends in water quality parameters and trophic level of Lake Xingkai / Khanka. // Environ Monit Assess. 2025. Vol. 197. 1359.
9. Шестеркин В.П. Особенности формирования химического состава воды озера Ханка // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Новочеркасск: ООО «Лик», 2021. С. 393–398.
10. Коженкова С.И., Юрченко С.Г. Содержание биогенных элементов в воде рек Спасовка и Комиссаровка, Приморский край // Геосистемы Северо-Восточной Азии: природные и социально-экономические структуры: сборник научных статей. Владивосток: ТИГ ДВО РАН, 2023. С. 102–106.
11. Yu Shuling, Li Xiaoyu, Wen Bolong, Chen Guoshuang, Hartley Anne, Jiang Ming, Li XiuJun. Characterization of water quality in Xiao Xingkai Lake: implications for trophic status and management // Chinese geographical science. 2021. Vol. 31, N 3. P. 558–570.
12. Wu Y., Chen D., Liu Y., Li F., Wang P., Wang R., Shamov V.V., Zhu A.-X., Deng C. Water quality changes in the Xingkai (Khanka) Lake, Northeast China, driven by climate change and human activities: insights from published data (1990–2020) // Water. 2024. N 16. 3080.
13. Егидарев Е.Г., Базаров К.Ю., Мишина Н.В. Современное использование земель в бассейне оз. Ханка // Геосистемы Северо-Восточной Азии: особенности их пространственно-временных структур, районирование территории и акватории. Сборник научных статей. Владивосток: ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, 2019. С. 197–203.
14. Bugaets A.N., Lupakov S.Yu., Gonchukov L.V., Shamov V.V. The Influence of Tributary Runoff Components on the Dynamics of the Khanka Lake Level // Water Resources. 2025. Vol. 52. P. 843–852.
15. Zsolnay A. Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions // Geoderma. 2003. Vol. 113. P. 187–209.
16. Weishaar J., Aiken G., Bergamaschi B., Fram M., Fugii R., Mopper K. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon // Environ. Sci. Technol. 2003. Vol. 37. P. 4702–4708.
17. Helms J.R., Ritchie J.D., Stubbins A., Jason D., Minor E.C., Kieber D.J., Mopper K. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter // Limnol. Oceanogr. 2008. Vol. 53, N 3, P. 955–969.
18. Ермошин В.В., Пшеничникова Н.Ф. Картографическое изучение почвенно-географических закономерностей бассейна Амура // География и природные ресурсы. 2009. № 4. С. 25–32.
19. Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by World Rivers. // Amer. J. Sci. 1982. Vol. 282, N 4. P. 401–450.
20. Иванов Г.И. Почвенная карта Приморского края. Масштаб 1 : 500000. Хабаровск: ГУГК № 2, 1983. 4, 5, 7, 8 листы.
21. Zsolnay A. Dissolved humus in soil waters // Piccolo A. (Ed.). Humus Substances in terrestrial ecosystems. Amsterdam: Elsevier, 1996. P. 171–223.
22. Бульон В.В. Автохтонное и аллохтонное органическое вещество в трофической цепи озерных экосистем // Труды ЗИН. 2017. Т. 321, № 2. С. 115–128.
23. Линник П.Н., Жежеря В.А., Линник Р.П. Роль нейтральной фракции растворенных органических веществ в миграции металлов в поверхностных водах: I. Содержание и источники углеводов в разнотипных водных объектах // Экологическая химия. 2017. Т. 26, № 4. С. 214–222.
24. Lutsenko T.N., Chernova E.N., Lysenko E.V., Ryzhakov D.S. Organic matter in the small lakes of the Sikhote-Alin Biosphere Reserve Organic Matter in the Small Lakes of the Sikhote-Alin Biosphere Reserve // Achievements in the Life Sciences. 2015. Vol. 9 (1). P. 32–36.

25. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Формирование химического состава вод озёр в условиях изменения окружающей среды. Москва: Наука, 2010. 266 с.
26. Yuan Y., Jiang M., Zhu X., Yu H., Otte M.L. Interactions between Fe and light strongly affect phytoplankton communities in a eutrophic lake // *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 126, 107664.
27. Савенко В.С., Савенко А.В. Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. Москва: ГЕОС, 2007. 247 с.

References

1. Baklanov, P.Y.; Kachur, A.N.; Ermoshin, V.V.; Kozhenkova, S.I.; Bugaets, A.N.; Bazarova, V.B.; Shamov, V.V.; Makhinov, A.N.; Kim, V.I. Current geo-ecological problems within the Lake Khanka drainage basin. *Geography and Natural Resources*. 2019; 40(4):325–334.
2. Shchur, L.A.; Bondarenko, N.A. Comparative analysis of phytoplankton of lakes Baikal and Khanka. *Hydrobiological Journal*. 2012;48(1):16–26. (In Russian).
3. Aponasenko, A.D.; Lopatin, V.N.; Shchur, L.A.; Filimonov, V.S.; Nazarov, V.A. Modern state of Khanka Lake by some hydrobiological and hydrophysical indicators. *Izvestiya TINRO*. 2000;(127):535–558. (In Russian).
4. Chudaeva, V. A. Chemical elements migration in the waters of the Far East. Vladivostok: Dalnauka, 2002; 392 p. (In Russian).
5. Matveev, V.I.; Kurnosova (Vazhova), A.S.; Kataikina, O.I. Results of monitoring of Lake Khanka in 2016–2018. *Pacific Geography*. 2020;(3):47–55. (In Russian).
6. Kataykina, O.I.; Matveev, V.I.; Figurkin, A.L. Hydrological and hydrochemical characteristics of the south-western part of Lake Khanka in winter of 2016–2023. *Hydrometeorology and ecology*. 2023;(73):699–710. (In Russian).
7. Kozhenkova, S.I.; Yurchenko, S.G.; Bazarov, K.Yu. Nutrients in the rivers of the Lake Khanka drainage basin. *Pacific Geography*. 2024;(2):107–119. (In Russian).
8. Kurnosova, A.S.; Matveev, V.I.; Kataykina, O.I. Trends in water quality parameters and trophic level of Lake Xingkai / Khanka. *Environ Monit Assess*. 2025;(197):1359.
9. Shesterkin, V.P. Specific features of forming of the chemical composition of the water in Khanka Lake. In *Trans-boundary water bodies: use, management, and protection: All-Russian theoretical and practical conference with international participation*. LLC “Lik”: Novocherkassk, Russia, 2021:393–398. (In Russian).
10. Kozhenkova, S.I.; Yurchenko, S.G. Content of Biogenic Elements in the Water of the Spasovka and Komisarovka Rivers, Primorsky Krai. In *Collection of Articles Geosystems of Northeast Asia: Natural and Socio-Economic Structures*. TIG FEB RAS: Vladivostok, Russia, 2023:102–106. (In Russian).
11. Yu, Shuling; Li, Xiaoyu; Wen, Bolong; Chen, Guoshuang; Hartley, Anne; Jiang, Ming; Li, Xiujun. Characterization of water quality in Xiao Xingkai Lake: implications for trophic status and management. *Chinese geographical science*. 2021;31(3):558–570.
12. Wu, Y.; Chen, D.; Liu, Y.; Li, F.; Wang, P.; Wang, R.; Shamov, V.V.; Zhu, A.-X.; Deng, C. Water quality changes in the Xingkai (Khanka) Lake, Northeast China, driven by climate change and human activities: insights from published data (1990–2020). *Water*. 2024;(16):3080.
13. Egidarev E.G., Bazarov K.Y., Mishina N.V. Current landuse in the Khanka Lake basin. In *Geosystems of North-East Asia: the peculiarities of their spatial-temporal structures, zoning of land and waters* /Eds. P.Y. Baklanov, V.V. Yermoshin, K.S. Ganzey, Pacific Institute of Geography FEB RUS: Vladivostok, Russia, 2019:197–203. (In Russian).
14. Bugaets, A.N.; Lupakov, S.Yu.; Gonchukov, L.V.; Shamov, V.V. The Influence of Tributary Runoff Components on the Dynamics of the Khanka Lake Level. *Water Resources*. 2025;(52):843–852.
15. Zsolnay, A. Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions. *Geoderma*. 2003;(113):187–209.
16. Weishaar, J.; Aiken, G.; Bergamaschi, B.; Fram, M.; Fugii, R.; Mopper, K. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. *Environ. Sci. Technol*. 2003;(37):4702–4708.
17. Helms, J.R.; Ritchie, J.D.; Stubbins, A.; Jason, D.; Minor, E.C.; Kieber, D.J.; Mopper, K. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnol. Oceanogr*: 2008;53(3):955–969.
18. Yermoshin, V.V.; Pshenichnikova, N.F. Cartographic study of the soil-geographical regularities within the Amur basin. *Geography and Natural Resources*. 2009;30(4):332–339. (In Russian).
19. Meybeck, M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by World Rivers. *Amer. J. Sci*. 1982;282(4): 401–450.
20. Ivanov, G.I. Soil map of Primorsky Krai. Scale 1:500000. GUGK № 2: Khabarovsk, Russia, 1983; Sheets 4, 5, 7, 8. (In Russian).
21. Zsolnay, A. Dissolved humus in soil waters. In: Piccolo, A. (Ed.), *Humus Substances in terrestrial ecosystems*. Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 1996; 171–223.
22. Boulion, V.V. Autochthonous and allochthonous organic matter in the trophic chain of lake ecosystems. *Proceedings of ZIN*. 2017;321(2):115–128. (In Russian).
23. Linnik, P.N.; Zhezherya, V.A.; Linnik, R.P. Role of neutral fraction of dissolved organic matter in the migration of metals in surface waters: I. Content and sources of carbohydrates in different type water bodies. *Ecological Chemistry*. 2017;26(4):214–222. (In Russian).

24. Lutsenko, T.N.; Chernova, E.N.; Lysenko, E.V.; Ryzhakov, D.S. Organic matter in the small lakes of the Sikhote-Alin Biosphere Reserve. *Achievements in the Life Sciences*. 2015;9(1):32–36.
25. Moiseenko, T.I.; Gashkina, N.A. Formation of the chemical composition of lake waters under environmental conditions. Nauka: Moscow, Russia, 2010; 266 p. (In Russian).
26. Yuan, Y.; Jiang, M.; Zhu, X.; Yu, H.; Otte, M.L. Interactions between Fe and light strongly affect phytoplankton communities in a eutrophic lake. *Ecological Indicators*. 2021;(126):107664.
27. Savenko, V.S.; Savenko, A.V. Phosphorus geochemistry in the Global hydrological cycle. GEOS: Moscow, Russia, 2007; 247 p. (In Russian).

Статья поступила в редакцию 13.05.2026; одобрена после рецензирования 19.06.2026; принята к публикации 19.06.2026.

The article was submitted 13.05.2026; approved after reviewing 19.06.2026; accepted for publication 19.06.2026.

