

Часть 2.

Природные и природно-ресурсные геосистемы: типы, современное состояние и динамика

УДК 550.46:504.064(571.63)

DOI: 10.35735/9785605515623_70

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОЗЕРЕ ХАНКА И ЕГО ПРИТОКАХ

Болдескул А.Г., Шулькин В.М., Юрченко С.Г., Луценко Т.Н., Шамов В.В., Катрасов С.В.

ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток

Аннотация. В работе представлены результаты мониторинга содержания биогенных элементов – общего растворённого кремния, общего и минерального фосфора, нитратного азота – в водах озера Ханка и четырёх впадающих рек (Спасовка, Илистая, Мельгуновка, Комиссаровка) за период с января по ноябрь 2025 г. Установлены пространственные и сезонные закономерности распределения биогенных элементов. Концентрации растворённого кремния в речных водах (6.0 ± 1.4 мгSi/л) выше, чем в озёрных (3.8 ± 0.9 мгSi/л), с выраженной сезонной динамикой в реках и меньшими амплитудами колебаний в озере. Концентрации фосфора в озере превышают речные в 2–4 раза летом и осенью, что связано с аккумуляцией биогенных элементов, разложением органики и потоком из донных отложений; доля минеральной формы фосфора в озере (в среднем 70 %) выше, чем в реках (в среднем 45 %). Наибольшие уровни нитратов зафиксированы в р. Спасовка (0.8 ± 0.2 мг N/л), что может свидетельствовать об антропогенном воздействии, тогда как в других реках концентрации ниже и отражают преимущественно природные процессы. Отмечена пространственная неоднородность озерных вод: в юго-восточной прибрежной зоне концентрации кремния, азота и фосфора снижены в 2–3 раза. Выявленные закономерности подчёркивают роль озера Ханка как приёмника и зоны трансформации биогенных элементов, а также указывают на потенциальные риски эвтрофикации, особенно при высоких летних концентрациях общего фосфора (до 90 мкг/л).

Ключевые слова: озеро Ханка, реки, биогенные элементы, кремний, фосфор, нитратный азот, сезонная динамика.

SPATIO-TEMPORAL REGULARITIES IN THE DISTRIBUTION OF BIOGENIC ELEMENTS IN LAKE KHANKA AND ITS TRIBUTARIES

Boldeskul A.G., Shulkin V.M., Yurchenko S.G., Lutsenko T.N., Shamov V.V., Katrasov S.V.
Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok

Annotation. The paper presents the results of monitoring the content of biogenic elements — total dissolved silicon (TDSi), total (TDP) and phosphate phosphorus (P-PO₄), and nitrate nitrogen (N-NO₃) – in the waters of Lake Khanka and four tributary rivers (Spasovka, Ilistaya, Melgunovka, and Komissarovka) for the period from January to November 2025. The spatial and seasonal distribution of biogenic elements has been established. The concentrations of TDSi in river waters (6.0 ± 1.4 mg Si/l) are higher than those in the lake water (3.8 ± 0.9 mg Si/l), with pronounced seasonal dynamics in rivers and lower amplitudes of fluctuations in the lake. Phosphorus concentrations in the lake are 2–4 times higher than in the rivers in summer and autumn, which is due to the accumulation of nutrients, the decomposition of organic matter, and the flow from the bottom sediments. The percentage of P-PO₄ in the lake (average 70%) is higher than that in the rivers (average 45%). The

highest levels of N-NO₃ were recorded in the Spasovka River (0.8±0.2 mg N/l), which may indicate anthropogenic impact, while concentrations in other rivers are lower and reflect primarily natural processes. Spatial heterogeneity of lake waters was noted: in the southeastern coastal zone, concentrations of TDSi, N-NO₃, TDP and P-PO₄ are 2–3 times lower. The results of the monitoring highlight the role of Lake Khanka as a reservoir and transformation zone for biogenic elements, indicating potential risks of eutrophication, particularly when summer concentrations of total phosphorus reach 90 µg P/l.

Keywords: *Lake Khanka, rivers, biogenic elements, total dissolved silicon (TDSi), total dissolved phosphorus (TDP), phosphate phosphorus (P-PO₄), nitrate nitrogen (N-NO₃), seasonal dynamics.*

Введение. Глобальный гидрологический цикл и роль биогенных элементов в его функционировании широко изучаются учёными на протяжении многих лет на различных водных объектах. Тем не менее актуальность этих исследований сохраняется, поскольку антропогенная деятельность продолжает усиливать биогенную нагрузку на водные экосистемы, провоцируя эвтрофирование. Озёра, из-за особенностей гидродинамики и вещественного обмена, оказываются наиболее уязвимыми компонентами гидросферы.

На содержание биогенных элементов в водных экосистемах влияет комплекс взаимосвязанных факторов, определяющих общий химический состав вод в целом и биогенных элементов в частности. К ним относятся климатические условия, ландшафтные характеристики водосбора, морфометрические и геоморфологические особенности бассейна, а также характер природопользования и интенсивность антропогенного воздействия. В каждом конкретном регионе значимость отдельных факторов может существенно различаться, определяя специфику гидрохимического режима.

Озеро Ханка — крупнейший трансграничный водоём Дальнего Востока, расположенный на границе России и Китая. Его площадь составляет около 4 070 км², средняя глубина — 4.5 м, максимальная — 10.6 м [2]. В водоём впадает 24 реки, включая основные притоки (Комиссаровка, Мельгуновка, Илистая, Спасовка), а вытекает река Сунгача — приток Уссури. Озеро обладает особым природоохранным статусом: часть его территории входит в состав Ханкайского заповедника, который вместе с китайским заповедником «Синкай-ху» образует международную охраняемую зону. По данным П.Я. Бакланова с соавторами [2], в последние десятилетия в бассейне озера фиксируются природные и антропогенные изменения, включая рост уровня воды и усиление сельскохозяйственной нагрузки.

Трофический статус озера Ханка характеризуется как мезотрофный с чертами олиготрофности, что подтверждается показателями биомассы фитопланктона (0.28–1.94 г/м³) [8]. В водоёме доминируют нанопланктонные формы водорослей размером 2–10 мкм, которые отличаются высокой продуктивностью и эффективно используют биогенные элементы. Учитывая установленные характеристики водоёма и их влияние на процессы биогеохимического цикла, целью исследования является изучение сезонной динамики содержания биогенных элементов в водах озера Ханка и четырёх впадающих в него наиболее крупных рек (Комиссаровка, Мельгуновка, Илистая, Спасовка). Объектами исследования выступают общий растворённый кремний, общий растворённый фосфор, фосфор минеральный, азот нитратный.

Объекты и методы. Отбор гидрохимических проб проводился ежемесячно с января по ноябрь 2025 г. в нижнем течении рек Спасовка, Илистая, Мельгуновка и Комиссаровка, а также в трёх точках прибрежной зоны озера Ханка (юго-восточной, западной и северо-западной; рис. 1). Юго-восточная прибрежная зона озера подвержена влиянию стока реки Спасовка, тогда как остальные точки отбора озёрных вод расположены за пределами прямого воздействия речного стока. В марте отбор проб не проводился из-за ледохода. В июле 2025 г. дополнительно отобрали 7 проб в центральной части озера. Пробы доставляли в

стационарную лабораторию в течение суток и анализировали на следующий день. Нитраты и фосфаты определяли в фильтратах (Millipore PVDF, диаметр 47 мм, размер пор 0.45 мкм). Нитраты измеряли методом жидкостной хроматографии с использованием прибора Shimadzu LC-10. Концентрацию фосфора фосфатов устанавливали спектрофотометрическим методом с молибдатом аммония. Общий растворенный кремний и общий растворенный фосфор анализировали методом ИСП-ОЭС на приборе Plasma 3000 NCS в фильтрованной и подкисленной аликвоте. Все анализы выполнены в ЦКП «Центр ландшафтной экодиагностики и ГИС-технологий ТИГ ДВО РАН» в соответствии со стандартными методиками гидрохимического анализа.

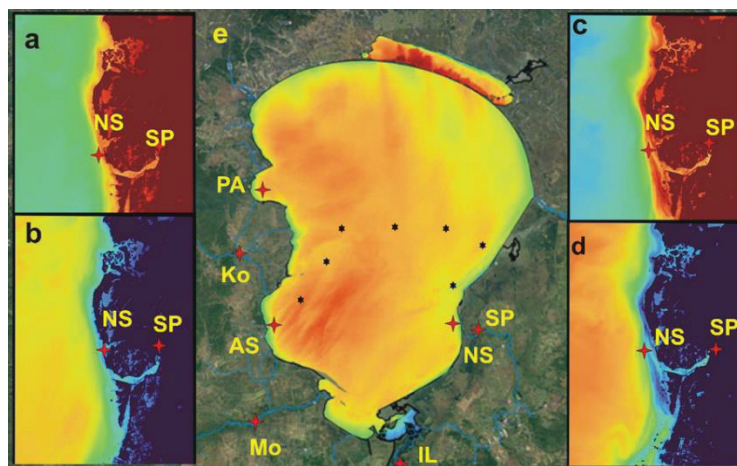


Рис. 1. Схема расположения станций сезонного мониторинга химического состава вод бассейна оз. Ханка в 2025 г. на фоне распределения индекса NDWI рассчитанного по композиту снимка Landsat 8 от 30.05.2025; SP – р. Спасовка, IL – р. Илистая, Mo – р. Мельгуновка, Ko – р. Комиссаровка, NS – юго-восточное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

Результаты и обсуждение. Воды озера Ханка и впадающих рек характеризуются минерализацией в диапазоне от 40 до 200 мг/л и преимущественно гидрокарбонатным магниево-кальциевым составом. Исключение составляет р. Илистая, для которой установлен сульфатно-гидрокарбонатный магниево-кальциевый тип вод. Показатель pH в речных водах в среднем за год составляет 6.8 ± 0.2 , в озёрных — 7.7 ± 0.7 . Полученные значения согласуются с данными, опубликованными ранее другими исследователями [7].

Воды озера Ханка и питающих его рек демонстрируют выраженные различия в концентрациях биогенных элементов (N, P, Si), что определяет специфику трофической структуры и продуктивность водной экосистемы. Эти различия обусловлены особенностями водообмена, сезонной динамикой стока, а также процессами трансформации биогенных веществ. В озерах происходят процессы, приводящие к перераспределению элементов между компонентами экосистемы, что формирует буферный механизм регуляции биогенного стока [4]. Важно отметить, что наблюдаемая сезонная динамика биогенных элементов тесно связана с продукционной активностью водоёма. Пик развития фитопланктона приходится на летний период, что обусловлено оптимальными температурными условиями и повышенной солнечной активностью. В зимний сезон отмечается закономерное снижение показателей продуктивности, обусловленное сезонными факторами и особенностями водообмена [1].

Кремний, несмотря на то что он является литофильным элементом, поступающим в природные воды преимущественно из пород, является критически важным для диатомовых

водорослей и активно ими потребляется. При интенсификации продуктивности водоемов происходит его более активная утилизация [4]. В речных водах бассейна озера Ханка средний уровень растворённого кремния составляет 6.0 ± 1.4 мгSi/л. В целом сезонная динамика кремния в реках носит трёхфазный характер. 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 вод, что приводит к снижению концентраций. Летом и осенью отмечается рост содержания, обусловленный поступлением кремния с поверхностным стоком с водосбора. При этом максимальные концентрации Si (до 8.4 мг/л) зафиксированы в реке Комиссаровка в летний период – в июне и в августе (рис. 2а), что может быть связано с особенностями водосбора и временным интервалом между выпадением осадков и пробоотбором.

В озёрных водах средняя концентрация растворённого кремния ниже, чем в реках — 3.8 ± 0.9 мгSi/л, что, вероятно отражает более высокий уровень продукции фитопланктона по сравнению с реками. Особенно выделяется юго-восточное побережье, где содержание растворенных силикатов понижается до 1.3 ± 0.7 мгSi/л. Это в 2–3 раза ниже средних показателей по акватории и свидетельствует о наиболее активном потреблении кремния фитопланктоном в этой части озера (рис.1 а, с). Сезонная динамика растворённого кремния в озере повторяет тренды для речных вод (снижение весной, рост летом и осенью), но с меньшими амплитудами колебаний (рис.2 а). Аналогичная роль озёр как зон трансформации и аккумуляции кремния отмечена и в исследованиях на водных объектах Карелии, где показано перераспределение форм кремния и его потребление фитопланктоном в зависимости от сезона и типа водоёма [5]. Даже при локальных отклонениях (например, в юго-восточном побережье оз. Ханка) сохраняются общие закономерности сезонной динамики кремния: снижение концентраций от зимы к весне с последующим возрастанием.

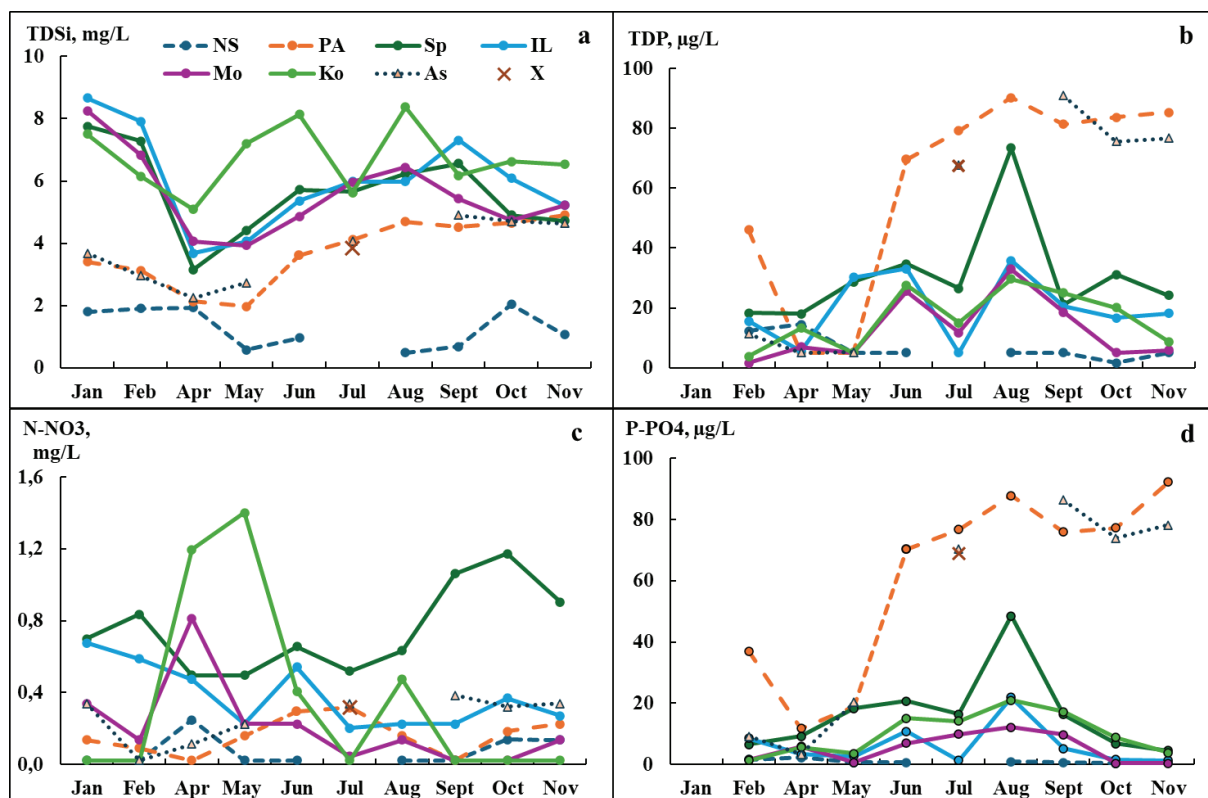


Рис. 2. Сезонная изменчивость концентраций биогенных элементов в нижнем течении рек в самом озере Ханка в 2025 г. (а) - кремний общий растворенный (TDSi), мг/л., (б) фосфор общий растворенный (TDP), мкг/л, (с) -азот нитратов (N-NO₃), мг/л, (д) -фосфор фосфатов (P-PO₄) мкг/л.

Анализ распределения общего и минерального фосфора выявил несколько закономерностей. Среднее за год содержание TDP и P-PO₄ в реках бассейна оз. Ханка составляет 18.5±13.8 и 9.5±9.3 мкгP/л соответственно. На рисунке (рис. 2 b, d) чётко видна сезонная и пространственная динамика концентраций. Максимальные концентрации среди рек характерны для р. Спасовка. Это может быть связано с особенностями водосбора, с выраженной антропогенной нагрузкой [3]. Пики концентраций TDP и P-PO₄ наблюдаются в летний период. Снижение уровней фосфора в зимний период обусловлено уменьшением биологической активности и меньшим поступлением с водосборного бассейна.

В озёрной воде среднее за год содержание TDP и P-PO₄ составляет 45.1±33.6 и 39.3±36.3 мкгP/л соответственно. При этом, как и в случае с кремнием, отмечается пространственная неоднородность. Крайне низкие концентрации как общего, так и минерального фосфора в юго-восточном побережье озера (5-15 и 1-2 мкгP/л соответственно) могут свидетельствовать о более интенсивном поглощении здесь фосфатов по сравнению с другими участками озера.

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 водоёме, внутриводоёмными процессами, сезонным развитием фитопланктона и его последующим отмиранием, а также потоком фосфора из донных отложений [6].

Соотношение форм фосфора отражает особенности круговорота элемента в разных водных объектах. В реках доля минеральной формы фосфора от общего содержания составляет в среднем около 45 %. В основной части озера доля минеральной формы от общего содержания повышается и составляет в среднем около 70 %. Это указывает на активную трансформацию органики в озере: быструю минерализацию органических соединений фосфора и эффективный обмен между растворёнными и взвешенными формами. Исключением опять является юго-восточный участок озера, где концентрации фосфора находятся на пределе обнаружения и наблюдается тенденция к преобладанию органических форм. Высокие летние концентрации общего фосфора в основной части озера (до 90 мкгP/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 растворённого фосфора подчёркивают сложность биогеохимических процессов в акватории озера Ханка и необходимость комплексного подхода, а также учёта роли донных отложений и взвешенных частиц в круговороте фосфора.

В реках бассейна озера Ханка наблюдаются заметные различия в концентрации нитратного азота и выраженная сезонная динамика (рис. 2 c). Река Спасовка характеризуется наиболее высокими уровнями нитратов, варьирующими в диапазоне 0.5–1.2 мгN/л при среднем значении 0.8±0.2 мгN/л. Зимой концентрация составляет 0.7–0.8 мгN/л из-за замедления биотических процессов и снижения водности. Весной, в период половодья (апрель — май), уровень снижается до 0.5 мг N/л за счёт разбавления талыми водами. Осенью фиксируется пик до 1.1–1.2 мгN/л, что может свидетельствовать о разложении органики 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. Весенний максимум (апрель — май) может быть 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 [3]. Река Илистая занимает промежуточное положение с диапазоном 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 мгN/л за счёт

разбавления. После половодья концентрация остаётся стабильно низкой, без выраженного осеннего роста.

Озеро Ханка, в отличие от рек, отличается более низкими концентрациями нитратного азота. В исследованных прибрежных зонах годовой диапазон составляет 0.02–0.4 мгN/л. Также отмечается характерная пространственная неоднородность – на юго-востоке концентрации минимальны почти весь год и составляют 0.02 мгN/л. Сезонная изменчивость слабо выражена, но не однозначна – весной на юго-востоке и западе отмечается незначительное повышение концентраций, а на северо-западе небольшое снижение. Летом на северо-западе и западе концентрации растут, а на юго-востоке падают. Менее выраженная динамика в озере Ханка свидетельствует о его самоочищающем и регулирующем потенциале. Вместе с тем для комплексной оценки трофического статуса водоёма необходимо дополнительное изучение других форм азота — аммонийного и органического, — чтобы получить полную картину биогенной нагрузки и потенциальных рисков эвтрофикации.

Выводы

1. Концентрация растворённого кремния в речных водах бассейна озера Ханка (6.0 ± 1.4 мгSi/л) в 1,5–2 раза выше, чем в озере ($3,8 \pm 0,9$ мгSi/л). Сезонная динамика в реках характеризуется максимумом зимой, снижением весной из-за разбавления, ростом летом и осенью. В озере колебания менее выражены, но сохраняют тот же тренд.

2. Концентрации общего и минерального фосфора в озере Ханка в 2–4 раза превышают речные летом и осенью, что обусловлено активным развитием фитопланктона, разложением органики, потоком из донных отложений. В реках доля минеральной формы фосфора составляет в среднем 45%, и повышается в озере до 70%, что указывает на активную трансформацию форм фосфора в озерной воде.

3. Наибольшие концентрации нитратного азота наблюдаются в р. Спасовка (0.5–1.2 мг N/л), что может быть следствием антропогенного воздействия. В реках Комиссаровка и Мельгуновка уровни ниже (0.02–1.4 и 0.02–0.8 мг N/л соответственно), с весенними пиками из-за вымывания азота из почвы. Озеро отличается более низкими и стабильными концентрациями (0.02–0.4 мг N/л) и минимальной сезонной изменчивостью.

4. Пространственные различия (например, обеднение силикатами, нитратами и низкие уровни фосфора в юго-восточном прибрежье) могут быть связаны прежде всего с активным потреблением биогенных элементов фитопланктоном.

Таким образом, озеро Ханка выполняет функцию приёмника биогенных элементов и зоны их трансформации, сглаживая сезонные колебания, характерные для рек. Высокие летние концентрации фосфора создают риски эвтрофикации.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 25-47-00022 «Трансформация гидрологического режима и её экологическое воздействие на российско-китайскую трансграничную геосистему оз. Ханка в условиях изменения окружающей среды».

Литература

1. Апонасенко А.Д., Лопатин В.Н., Щур Л.А., Филимонов В.С., Назаров В.А. Современное состояние озера Ханка по некоторым гидробиологическим и гидрофизическим показателям // Известия Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра. — 2000. Т. 127. — С. 535-558.

2. 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. С. 33–43. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(33-43)

3. Коженкова, С. И., Юрченко, С. Г., Базаров, К. Ю. Биогенные вещества в реках водосборного бассейна озера Ханка // Тихоокеанская география. — 2024. — №2. — С. 107–119.

4. Моисеенко Т. И., Гашкина Н. А. Формирование химического состава вод озёр в условиях изменения окружающей среды / Т. И. Моисеенко, Н. А. Гашкина; Российская акад. наук, Ин-т водных проблем РАН. — Москва: Наука, 2010. — 266, с.

5. Рыжаков, А. В., Вапиров, В. В., Степанова, И. А. Кремний в поверхностных водах гумидной зоны (на примере водных объектов Карелии) // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. Серия: Лимнология. Петрозаводск, 2019. №3. С. 52–60.

6. Савенко, В. С., Савенко, А. В. Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле / В. С. Савенко, А. В. Савенко; МГУ им. М. В. Ломоносова, Геогр. фак. — Москва: ГЕОС, 2007. — 247 с.

7. Чудаева В. А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока / В. А. Чудаева. — Владивосток: Дальнаука, 2002. — 392 с.

8. Щур Л.А., Бондаренко Н.А. Сравнительный анализ фитопланктона озер Байкал и Ханка // Гидробиологический журнал. — 2012. Т. 48. — № 1. — С. 16-26.