

Современная оценка содержания азота и фосфора в речной воде и снежном покрове в бассейне Южного Байкала

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYОнищук Н.А.[✉], Томберг И.В.[✉], Нецветаева О.Г.[✉]

Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье приведены результаты многолетних исследований химического состава воды притоков и снежного покрова юго-восточного и юго-западного побережий оз. Байкал. Проанализировано содержание разных форм азота и фосфора в речных водах и снежном покрове. Дана количественная оценка поступления общего азота и фосфора из атмосферы на водосборный бассейн Южного Байкала за 2019-2023 гг. Большую нагрузку по содержанию разных форм азота и фосфора в снежном покрове и воде притоков испытывает юго-западное побережье озера. Азот в снежном покрове и притоках Южного Байкала представлен преимущественно его минеральной формой. Реки юго-восточного побережья, имеющие исключительно атмосферное питание, в основном мало подвержены антропогенному воздействию, в то время как малые водотоки юго-западного побережья озера (пос. Листвянка) испытывают значительное влияние хозяйственной деятельности. В снежном покрове Южного Байкала и в речных водах юго-восточного побережья преобладает органическая форма фосфора. В воде притоков юго-западного побережья фосфор представлен его минеральной формой. Проведено сравнение современных данных с результатами прошлых лет.

Ключевые слова: притоки Южного Байкала, снежный покров, фосфор, азот, пос. Листвянка

Для цитирования: Онищук Н.А., Томберг И.В., Нецветаева О.Г. Современная оценка содержания азота и фосфора в речной воде и снежном покрове в бассейне Южного Байкала // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 5. - С. 1337-1356. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-5-1337

1. Введение

Наиболее подробные гидрохимические исследования притоков Южного Байкала проводились в 50-х годах прошлого века, в доиндустриальный период: была дана характеристика ионного, газового состава и концентраций биогенных элементов (Вотинцев и др., 1965). Результаты этих исследований отражают естественный природный фон в регионе и могут быть использованы для сравнения с современными данными. Исследования последних лет свидетельствуют о увеличении поступления в прибрежную воду Байкала соединений фосфора и азота в результате повышения антропогенной нагрузки на прибрежные районы озера. Работы показали, что в урбанизированных районах озера, в воде рек, протекающих через поселки и города, регистрировали высокие концентрации нитратов, аммония и фосфатов (Malnik et al., 2022; Onishchuk et al., 2022). Приток биогенных элементов обусло-

вил высокую продуктивность биоценозов прибрежных вод Байкала, что привело к массовому развитию не свойственных для озера видов макроводорослей, смене донных аборигенных видов-доминантов и нарушению естественной для экосистемы поясности в их распределении (Kravtsova et al., 2014; Timoshkin et al., 2016).

На юго-западном побережье оз. Байкал одним из наиболее значимых источников поступления азота и фосфора является поселок Листвянка - популярное туристическое место, где развита инфраструктура с большим количеством гостиниц, кафе и с высоким трафиком автомобильного и речного транспорта. Исследования водотоков (р. Крестовка, ручьи Бол. и М. Черемшанка, Каменушка), протекающих через поселок, проводятся в связи с возрастанием антропогенной нагрузки и угрозой эвтрофикации залива Лиственный. По литературным данным (Загоруйко и др., 2014; Воробьева и др., 2017; Костюкова, 2022), состав воды р. Крестовка

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: onischuk@lin.irk.ru (Н.А. Онищук)

Поступила: 27 сентября 2024; Принята: 28 октября 2024;

Опубликована online: 31 октября 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



за последние 50 лет значительно изменился в сторону снижения качества воды. В комплексных исследованиях было показано, что антропогенному воздействию подвергаются не только подземные и поверхностные воды, но и атмосферные осадки, растительность, почвы (Нечаева и др., 2010; Воробьева и др., 2016; Сутурин и др., 2016; Чебунина и др., 2018; Янчук и др., 2021). Отмечается, что в пос. Листвянка происходит устойчивое загрязнение грунтовых вод нитрат-ионами, реже ионами аммония (Напрасникова и др., 2007; Алексеев и др., 2016; Алексеев и др., 2018; Алексеева и Алексеев, 2023; Алексеева и др., 2023).

На юго-восточном побережье Байкала речные воды подвержены азотному закислению под воздействием атмосферных осадков. Основными источниками загрязнения атмосферы в этом районе являются железная дорога и автомобильная трасса, а также перенос загрязняющих веществ от Иркутско-Ангарского промышленного комплекса (Сорокикова и др., 2015; Sorokovikova et al., 2020; Sorokovikova et al., 2021). В настоящее время большая часть соединений азота, поступающих в наземные системы с атмосферными осадками, имеет техногенное происхождение и связана с эмиссией азота промышленными предприятиями и автотранспортом. По России выбросы этих газов от стационарных источников за период 2018–2022 гг. увеличились на 11%, в Иркутской области – на 3% (Обзор состояния..., 2023; Гос. Доклад..., 2023).

Как известно, снежный покров является удобным индикатором загрязнения атмосферного воздуха. Чувствительность снежного покрова к изменению уровня антропогенной нагрузки в регионе позволяет оценить влияние атмосферных выпадений, в том числе азота и фосфора, на химический состав поверхностных вод.

Целью работы стала оценка современного поступления соединений азота и фосфора из атмосферы, изучение сезонной и межгодовой динамики этих компонентов содержания в воде притоков Южного Байкала.

2. Материалы и методы исследования.

Изучено содержание соединений азота и фосфора в воде 2 групп притоков Южного Байкала. Первая группа – реки, берущие начало на северном склоне хребта Хамар-Дабан, наиболее репрезентативно отражающие изменения химического состава речных вод, вызванные поступлением загрязняющих веществ из атмосферы (Sorokovikova et al., 2020). Питание этих притоков осуществляется исключительно атмосферными осадками. Бассейны рек отличается высокой увлажненностью вследствие благоприятной ориентации по отношению к направлению преобладающего влагопереноса. Здесь выпадает наибольшее для Южного Прибайкалья количество осадков до 1060-1720 мм, толщина снежного покрова может достигать 2 м (Оболкин, 1989).

Вторая группа рек протекает по пос. Листвянка, который расположен на западном берегу

Южного Байкала по правую сторону от истока р. Ангара. Улицы поселка тянутся вдоль распадков, где протекают небольшие водотоки, самым многоводным из которых является р. Крестовка.

В притоках Южного Байкала, стекающих с северо-западного склона хр. Хамар-Дабан, пробы отбирались в устьях рек в разные гидрологические сезоны (март, май, июль, сентябрь) 2019-2023 гг. Учитывая высокую загрязненность прибрежных территорий западного побережья Южного Байкала, на водотоках в пос. Листвянка наблюдения проводились ежемесячно в двух створах: выше поселка (фоновый створ) и в устьевой части. Для количественной оценки поступления азота и фосфора из атмосферы в феврале (максимальный влагозапас в снежном покрове) отбирались пробы снежного покрова. В снеговой воде определялось содержание азота и фосфора, рассчитывалось их накопление в бассейнах изучаемых рек. Схема отбора проб снежного покрова и притоков Южного Байкала представлена на Рисунке 1.

В речной воде определялись минеральные формы азота (нитраты, нитриты, ионы аммония) и фосфора (фосфаты), а также их общее содержание. По разнице общих и минеральных форм рассчитывали органическую часть. Концентрации минеральных форм в речной воде измеряли на спектрофотометре ПЭ-5400ВИ (Россия): нитриты – с реактивом Грисса, нитраты – с салициловокислым натрием, аммонийный азот – индофенольным методом, фосфаты – методом Дениже-Аткинса с хлористым оловом в качестве восстановителя. В расплавах снега нитриты и фосфаты определяли так же, как и в речной воде, аммонийный азот измеряли спектрофотометрически с реактивом Несслера, нитраты – методом ионной хроматографии. Содержание общего фосфора и азота в пробах определяли на спектрофотометре после персульфатного окисления до фосфатов и нитратов соответственно (Wetzel and Likens, 2000; Khodzher et al., 2016; Аналитические..., 2017).

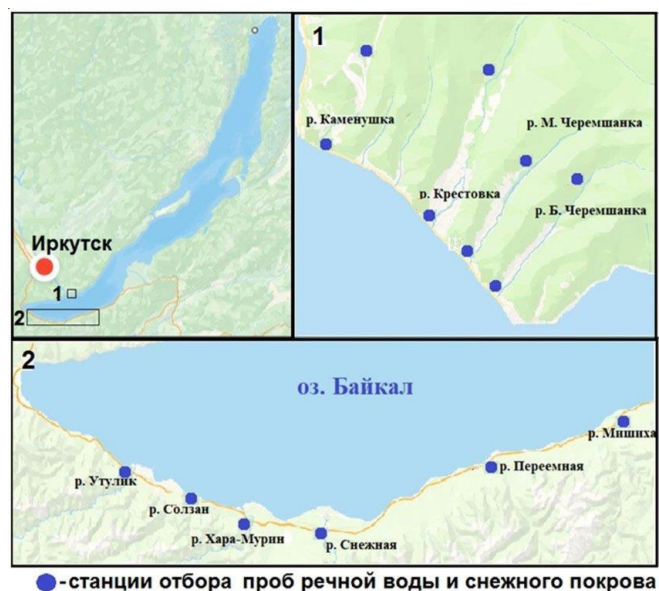


Рис.1. Схема отбора проб.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Содержание соединений азота и фосфора в снежном покрове в исследуемых районах

Как показали исследования, среднемноголетняя концентрация $N_{\text{общ}}$ в снежном покрове юго-восточного побережья озера составила $0,66 \text{ мг/дм}^3$ при колебаниях от $0,45$ до $1,13 \text{ мг/дм}^3$. Наиболее высокое среднее значение отмечено в бассейне р. Переемная ($0,78 \pm 0,21 \text{ мг/дм}^3$), подверженном дополнительному антропогенному воздействию вследствие переноса газовых компонентов примесей (оксидов азота) от промышленных источников, расположенных в Иркутской агломерации (гг. Иркутск, Ангарск, Шелехов). Наименьшим содержанием $N_{\text{общ}}$ характеризуется снежный покров в бассейне р. Хара-Мурин (в среднем $0,56 \pm 0,09 \text{ мг/дм}^3$). В межгодовой динамике наиболее «чистый» по содержанию $N_{\text{общ}}$ снежный покров отмечен в этом районе в 2020 г. ($0,55 \text{ мг/дм}^3$), наиболее «загрязненный» - в 2019 г. ($0,74 \text{ мг/дм}^3$). Как следует из Таблицы 1, большая часть азота в снежном покрове представлена его минеральной формой (в среднем 73%). Наиболее высокое содержание данной формы азота в снежном покрове зарегистрировано в устье р. Мишиха.

Среднемноголетнее содержание $P_{\text{общ}}$ в снежном покрове данного района варьировало в широких пределах, $9-109 \text{ мкг/дм}^3$ (Таблица 1) при среднем значении $27 \pm 12 \text{ мкг/дм}^3$. Максимальное содержание отмечено в бассейне р. Переемная, в среднем 44 мкг/дм^3 , минимальное (в 2,6 раз ниже) – в районе р. Хара-Мурин. Наиболее высокие концентрации $P_{\text{общ}}$, также, как и $N_{\text{общ}}$, на юго-восточном побережье отмечены в 2019 г. Как следует из Таблицы 1, в снежном покрове данной территории преобладает органическая форма фосфора. Ее содержание в среднем составляет 76 %. Максимум содержания $P_{\text{орг}}$ зафиксирован в бассейне р. Снежная. Доля минерального P в снежном покрове района не превышала 30%, максимум его содержания регистрировали в бассейне р. Утулик.

В снежном покрове юго-западного побережья Байкала среднемноголетняя концентрация $N_{\text{общ}}$ составила $1,1 \text{ мг/дм}^3$ при колебаниях от $0,6$ до $2,0 \text{ мг/дм}^3$. Наиболее высокое среднее значение отме-

чено в устье р. Бол. Черемшанка ($1,53 \pm 0,46 \text{ мг/дм}^3$). Атмосферный воздух в районе пос. Листвянка в холодный период испытывает значительную антропогенную нагрузку вследствие работы местной котельной, сжигающей мазут, печного отопления, а также большого потока транспортных средств по автомобильной трассе вдоль поселка и на льду озера в этом туристическом районе. Кроме того установлено, что при определенных метеорологических условиях загрязненные воздушные массы при северо-западном переносе попадают в этот район из ближайших промышленных городов Прибайкалья (Obolkin et al., 2021; Shikhovtsev et al., 2022). Наименьшее содержание $N_{\text{общ}}$ зарегистрировано в снежном покрове в верхнем течении р. Бол. Черемшанка, в 2 раза ниже, чем в устье. Такая же тенденция прослеживается и для снежного покрова, отобранного в верхнем и нижнем течениях остальных исследуемых рек в поселке. Наиболее низкие концентрации $N_{\text{общ}}$ в Листвянке отмечены в 2021 г. В сравнении с юго-восточным побережьем содержание $N_{\text{общ}}$ на юго-западном побережье Байкала в 1,6 раз выше, что связано с большей антропогенной нагрузкой на воздушную среду в поселке.

Как следует из Таблицы 2, азот в снежном покрове пос. Листвянка, также как и на юго-восточном побережье, представлен преимущественно его минеральной формой. Наибольшее содержание данной формы азота зафиксировано в устье руч. М. Черемшанка. Максимальное содержание $N_{\text{орг}}$ определено в снежном покрове в устье р. Крестовка. В минеральной форме азота на обоих побережьях отмечено преобладание азота нитратного. Его содержание колеблется в пределах 71-98%. Доля $N_{\text{мин}}$ в общем содержании азота в снежном покрове западного побережья схожее с восточным (74%).

Среднемноголетняя концентрация $P_{\text{общ}}$ в снежном покрове юго-западного побережья составляет $61 \pm 32 \text{ мкг/дм}^3$, что в 2,3 раза выше, чем на юго-восточном побережье. Значительно шире и диапазон колебаний данной величины ($10-610 \text{ мкг/дм}^3$). Максимум содержания зарегистрирован в нижнем течении р. Каменушка. Наиболее высокое среднее значение отмечено в 2022 г., в 2 раза превышающее среднемноголетнюю величину. Наименьшее содержание $P_{\text{общ}}$ (26 мкг/дм^3) определено в снежном покрове в верховьях ручьев М. и Бол. Черемшанка выше поселка в лесной зоне. Следует отметить, что

Таблица 1. Содержание разных форм фосфора и азота в снежном покрове в бассейне притоков юго-восточного побережья оз. Байкал, 2019-2023 гг.

Реки	Диапазон концентраций	% от $P_{\text{общ}}$		Диапазон концентраций	% от $N_{\text{общ}}$	
	$P_{\text{общ}}$, мкг/дм ³	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{орг}}$	$N_{\text{общ}}$, мг/дм ³	$N_{\text{мин}}$	$N_{\text{орг}}$
Утулик	9-88	29	71	0,58-0,83	72	28
Солзан	12-88	18	82	0,54-0,78	74	26
Хара-Мурин	9-31	23	77	0,45-0,64	72	28
Снежная	10-46	14	86	0,49-0,70	69	31
Переменная	14-109	20	80	0,58-1,13	73	27
Мишиха	10-60	26	74	0,61-0,78	78	22

Таблица 2. Содержание разных форм фосфора и азота в снежном покрове в бассейне притоков юго-западного побережья оз. Байкал, 2019-2023 гг.

Водотоки	Диапазон концентраций	% от $P_{\text{общ}}$		Диапазон концентраций	% от $N_{\text{общ}}$	
		$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{орг}}$		$N_{\text{мин}}$	$N_{\text{орг}}$
Бол. Черемшанка, устье	40-127	6	94	0,78-2,00	80	20
Бол. Черемшанка, выше поселка	22-29	25	75	0,60-0,86	72	28
М. Черемшанка, устье	10-75	13	87	0,76-1,87	88	18
М. Черемшанка, выше поселка	22-30	20	80	0,67-0,81	69	31
Крестовка, устье	23-127	37	63	0,73-1,51	65	35
Крестовка, выше поселка	17-59	23	77	0,69-0,79	76	24
Каменушка, устье	60-610	32	68	0,89-1,65	67	33
Каменушка, выше поселка	34-70	23	77	0,76-1,91	77	23

в верховьях исследуемых водотоков, выше поселка, содержание $P_{\text{общ}}$ в снежном покрове от 2 до 4 раз ниже, чем в низовьях рек, на территории самого поселка.

Расчет соотношений разных форм фосфора в снежном покрове в верховьях рек юго-западного побережья Байкала показал доминирование $P_{\text{орг}}$ (Таблица 2), также, как и на юго-восточном побережье. В среднем содержание $P_{\text{орг}}$ составляет 78 % от общего содержания фосфора, что близко к аналогичной величине на юго-восточном побережье (76%). Максимум данной величины зафиксирован в устье руч. Бол. Черемшанка. Наибольший вклад $P_{\text{мин}}$ отмечен в снежном покрове в устье р. Крестовка.

По многолетним данным рассчитано накопление $P_{\text{общ}}$ и $N_{\text{общ}}$ в снежном покрове изучаемых территорий. Как следует из Рис. 2, величина аккумуляции общего азота варьирует в пределах 28-103 мг/м². На юго-восточном побережье накопление данного компонента в среднем выше в 1,5 раза за счет большего влагозапаса (в 2-3 раза), с максимумом в устье р. Снежная. В Листвянке наибольшим накоплением $N_{\text{общ}}$ характеризуется бассейн р. Каменушка. Накопление $P_{\text{общ}}$ в снежном покрове

изменялось от 1,1 до 8,3 мг/м². Минимальная аккумуляция зарегистрирована в устье р. Мишиха, максимальная – также в бассейне р. Каменушка, в нижнем ее течении. Сравнение средних величин накопления фосфора в двух районах Южного Байкала показало большее (в 1,9 раз) накопление на юго-западном побережье вследствие больших концентраций в низовье р. Каменушка. За исключением этого участка, накопление данного компонента в снежном покрове двух побережий находится на одном уровне и не превышает 3 мг/м².

По данным снегомерных съемок и мониторинга атмосферных осадков на ст. Листвянка в 2019-2023 гг. и ст. Танхой (юго-восточное побережье озера) в 2023 г. рассчитано годовое выпадение из атмосферы общего азота и фосфора на подстилающую поверхность и оценено их поступление на акваторию Южного Байкала (Таблица 3). Как видно, величины выпадений $P_{\text{общ}}$ мало отличаются на исследуемых побережьях Южного Байкала. Выпадения же $N_{\text{общ}}$ на восточном берегу на 34 % выше за счет большего (в 2 р) количества осадков.

Для возможности сравнить наши данные с полученными ранее (в 1986-1987 гг.) для всего

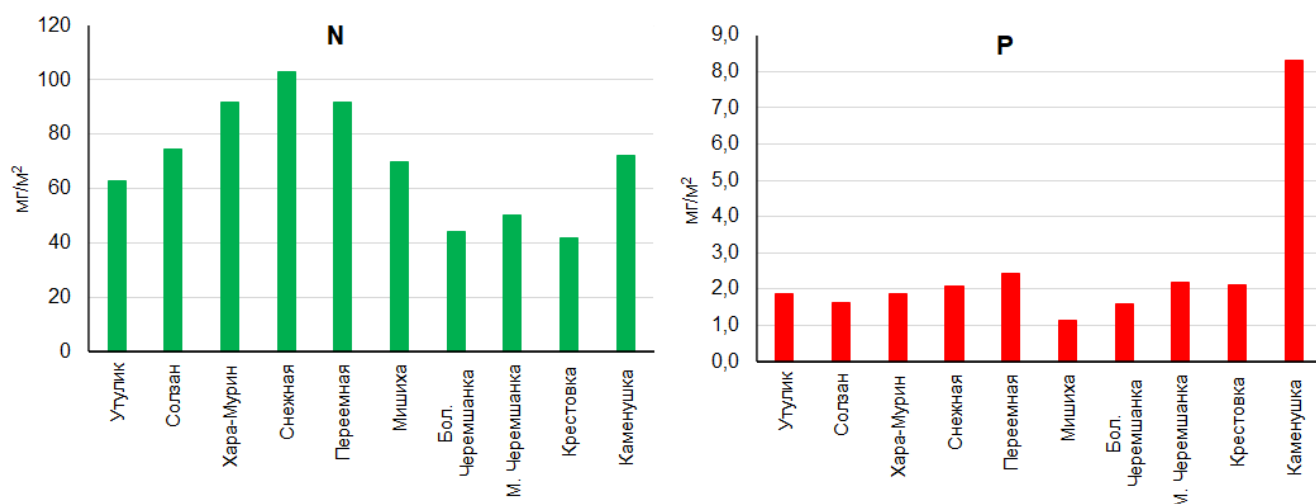


Рис.2. Накопление общего фосфора и общего азота в снежном покрове юго-восточного и юго-западного побережий оз. Байкал, мг/м² (2019-2023 гг.).

Таблица 3. Поступление общего фосфора и азота из атмосферы на акваторию оз. Байкал (в числителе - размах колебаний, в знаменателе - средние величины), 2019-2023 гг.

Район исследований	Годовое выпадение, т/км ² в год		Поступление из атмосферы, тыс. т/год			
			Южная котловина (7432 км ²)		Акватория оз. Байкал (31722 км ²)	
	Р _{общ}	N _{общ}	Р _{общ}	N _{общ}	Р _{общ}	N _{общ}
Юго-западное побережье	0,027	0,50	0,20	3,7	-	-
Юго-восточное побережье	0,030	0,67	0,22	5,0	-	-
Все озеро (2019-2023 гг.)	<u>0,008-0,057</u> 0,017	<u>0,16-1,1</u> 0,33	-	-	<u>0,3-1,8</u> 0,6	<u>5,0-34,9</u> 10,6
Все озеро (1986-1987 гг.) *	-	-	-	-	<u>0,6-0,8</u> 0,7	<u>5,9-8,3</u> 7,1

Примечание: * - Атлас озера Байкал, 1993.

озера были приняты некоторые допущения. Анализ данных многолетнего мониторинга атмосферных осадков на ст. Листвянка показал, что концентрации N_{общ} в снежных и дождевых выпадениях мало различаются. Содержание Р_{общ} в теплый период, как правило, до 2 раз выше. Поэтому в связи с отсутствием данных о содержании изучаемых компонентов в дождях в районе Среднего и Северного Байкала для расчета годовых выпадений азота брались их средние концентрации в снежном покрове, отобранном в разных районах побережья и акватории озера. Среднегодовое содержание Р_{общ} во влажных выпадениях находилось с учетом его больших величин в теплый период. Определенные таким образом концентрации умножались на годовое количество осадков в разных по увлажненности районах озера, 1320 мм для ст. Хамар-Дабан (Южный Байкал) и 190 мм для ст. Узур (о-в Ольхон, Средний Байкал). Количество осадков взято из работы (Оболкин и Ходжер, 1990). Полученные минимальные и максимальные величины поступления на акваторию озера представлены в Таблице 3. Диапазон колебаний их довольно широк из-за значительной разницы в количестве осадков на выбранных станциях (в 7 раз). Средние значения, которые представляются более достоверными, рассчитаны по среднему для Байкала количеству атмосферных осадков (400 мм) (Оболкин, 1989). Получено, что за 35 прошедших лет поступление N_{общ} из атмосферы на акваторию Байкала увеличилось в среднем в 1,5 р, поступление Р_{общ} особо не изменилось (Таблица 3). Следует сразу оговориться, что это первые оценки поступления выбранных компонентов на акваторию всего озера. Поэтому они носят предварительный характер и требуют дальнейших, более детальных исследований содержания органических форм фосфора и азота в атмосферных выпадениях в районе Среднего и Северного Байкала. Отмеченный рост выпадений N_{общ} из атмосферы в сравнении с 1980-ми гг. вероятно, обусловлен увеличением выбросов оксидов азота от стационарных источников и количества автотранспорта, поскольку он занимает в настоящее время лидирующее место в загрязнении окружающей среды.

3.2. Содержание соединений азота и фосфора в воде притоков юго-восточного побережья озера Байкал

Анализ многолетних данных показал, что содержание Р_{общ} в воде притоков юго-восточного побережья Байкала в основном низкое – 1-12 мкг/дм³. Более высокие концентрации регистрировали только в воде р. Снежная в летний период (до 23 мкг/дм³) (Рис. 3). Эта река – самый крупный и многоводный водоток в этом районе, длиной более 170 км. Повышение концентраций Р_{общ} летом в воде данной реки и на других реках (Утулик, Мишиха), вероятно, связано с увеличением содержания органического вещества в результате вегетации летнего фитопланктона. На остальных притоках этого района сезонной динамики выявить не удалось. Снижение концентрации Р_{общ} в 2022-2023 гг., возможно, связано с высокой водностью рек в эти годы. Как и в снежном покрове, в воде притоков доминирует органическая форма фосфора – 58-97% от общего содержания (среднее 73%), поэтому сред-

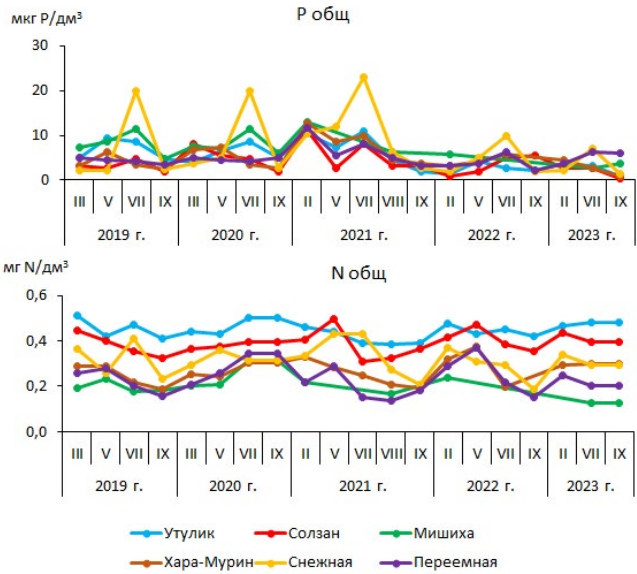


Рис.3. Сезонная и межгодовая динамика содержания общего фосфора и общего азота в воде притоков юго-восточного побережья оз. Байкал, 2019-2023 гг.

немноголетние значения $P_{орг}$ и динамика концентраций в основном совпадает с таковыми для $P_{общ}$. Содержание минеральной формы Р в реках очень низкое - среднемноголетнее значение 1 мкг/дм³. Максимальные концентрации $P_{мин}$ регистрировали зимой и весной - до 5 мкг/дм³, летом же в результате биоаккумуляции водорослями они снижались до следовых значений (Таблица 4).

Содержание $N_{общ}$ в воде притоков варьировало от 0,12 до 0,51 мг/дм³. Максимальные концентрации регистрировали в реках Утулик и Солзан, где среднемноголетние значения составляли 0,45 и 0,39 мг/дм³, соответственно. Минимальное содержание, со среднемноголетними значениями 0,21 и 0,24 мг/дм³, отмечено в реках Переемная и Мишиха (Рис. 3).

В отличие от фосфора, в составе которого большую часть года преобладала органическая форма, в составе азота доминировала минеральная составляющая (в среднем 70% от $N_{общ}$). Концентрации $N_{мин}$ в период исследования варьировали от 0,07 до 0,47 мг/дм³. В зимний период доля $N_{мин}$ достигала 79-92 % от общего содержания. Летом развитие планктона и поступление органического вещества с бассейна обуславливало некоторое снижение концентраций $N_{мин}$ и увеличение содержания $N_{орг}$ (до 0,29 мг/дм³), однако, в воде большинства рек и в этот период преобладал минеральный азот (Таблица 5).

Высокое относительное содержание $N_{мин}$ в воде рек, стекающих с Хамар-Дабанского хребта обусловлено, в основном, вкладом нитратов (90-100% от содержания $N_{мин}$). Концентрации нитратного азота в воде рек в период исследования варьировали от 0,08 до 0,47 мг/дм³. Максимальные значения этого компонента наблюдали зимой и в период половодья, минимальные – в летний период. Содержание аммонийного азота в воде притоков обычно было ниже 0,01 мг/дм³, и только в половодье или во время высоких летних паводков концентрации увеличивались до 0,04 мг/дм³ (около 10 % от $N_{мин}$). Нитритный азот в воде рек либо отсутствовал, либо регистрировался в следовых количествах (ниже 1 мкг/дм³).

В сравнении с данными 1950-х гг. (Вотинцев и др., 1965) концентрации нитратного азота в водах притоков юго-восточного побережья в современный период увеличились на 40-60 %. Содержание фосфатного фосфора практически не изменилось.

3.3. Содержание соединений азота и фосфора в воде притоков юго-западного побережья озера Байкал

В ручьях Бол. и Мал. Черемшанка в период с 2019 по 2023 гг. в устьевых участках концентрация $P_{общ}$ были выше, чем в верхнем течении (Рис. 4). Для р. Крестовка и руч. Каменушка ситуация обратная: содержание $P_{общ}$ в отдельные годы выше в верхнем течении (2020 и 2023 гг. для р. Крестовка, 2021 и 2023 гг. для руч. Каменушка).

По результатам нашего исследования, концентрации $P_{общ}$ в устье р. Крестовка изменялись от 3 до 190 мкг/дм³ со средним значением 19 мкг/дм³, выше поселка – от 3 до 74 мкг/дм³ со средним значением 18 мкг/дм³ (Таблица 6). По литературным данным, содержание в воде Крестовки данного компонента в 2008–2011 гг. было в пределах 10-360 мкг/дм³. С января по август 2012 г. среднее содержание общего фосфора составляло 37 мкг/дм³ с максимумом 90 мкг/дм³ (Загоруйко и др., 2014).

По нашим данным, межгодовая динамика содержания $P_{общ}$ в притоках юго-западного побережья озера Байкал демонстрирует прямую зависимость от туристического трафика. В 2020 г. в воде всех водотоков пос. Листвянка произошло значительное уменьшение содержания общего фосфора, что, вероятней всего, было связано с ограничительными мерами по посещению туристических мест в связи с заболеваемостью COVID-19. Снижение концентрации $P_{общ}$ во всех водотоках в этот период по сравнению с 2019 г. произошло в 2 раза (Рис. 4). По данным (Гос. Доклад..., 2023), в 2019 г. Иркутскую область посетило 1728 тыс. туристов, в 2020 г. - всего 938 тыс. В 2021 г. после снятия ограничительных мер среднегодовая концентрация общего

Таблица 4. Сезонная динамика содержания разных форм фосфора в воде притоков юго-восточного побережья оз. Байкал, 2019-2023 гг.

Реки	Зима			Весна			Лето			Осень		
	$P_{общ}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$	$P_{общ}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$	$P_{общ}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$	$P_{общ}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$
	мкг/дм ³	% от $P_{общ}$		мкг/дм ³	% от $P_{общ}$		мкг/дм ³	% от $P_{общ}$		мкг/дм ³	% от $P_{общ}$	
Утулик	1-10	18	82	4-9	3	97	3-11	22	78	1-5	31	69
Солзан	1-11	11	89	2-6	42	58	3-8	37	63	1-5	23	77
Хара-Мурин	3-13	25	75	4-9	16	84	3-10	19	81	1-4	20	80
Снежная	2-10	30	70	2-12	9	91	6-23	9	91	1-3	26	74
Переменная	3-12	21	79	3-5	25	75	3-9	30	70	2-6	28	72
Мишиха	6-13	42	58	3-9	20	80	3-11	35	65	4-6	13	87
Селенга*	36-52 41			26-198 84			52-112 79			21-43 31		

Примечание: *- Сорокикова и др., 2018, в числителе- размах концентраций, в знаменателе средняя концентрация.

Таблица 5. Сезонная динамика содержания разных форм азота в воде притоков юго-восточного побережья оз. Байкал, 2019-2023 гг.

Реки	Зима			Весна			Лето			Осень		
	N _{общ} , мг/дм³	N _{мин}	N _{орг}	N _{общ} , мг/дм³	N _{мин}	N _{орг}	N _{общ} , мг/дм³	N _{мин}	N _{орг}	N _{общ} , мг/дм³	N _{мин}	N _{орг}
		% от N _{общ}			% от N _{общ}			% от N _{общ}			% от N _{общ}	
Утулик	0,44-0,51	91	9	0,42-0,44	53	47	0,39-0,50	71	29	0,39-0,50	82	18
Солзан	0,37-0,45	92	8	0,37-0,50	80	20	0,31-0,40	60	40	0,31-0,37	67	33
Хара-Мурин	0,26-0,53	79	21	0,25-0,37	56	44	0,20-0,31	57	43	0,19-0,24	78	22
Снежная	0,29-0,37	88	12	0,26-0,43	57	43	0,27-0,43	48	52	0,19-0,23	81	19
Переемная	0,20-0,31	87	13	0,24-0,37	73	27	0,14-0,47	52	48	0,15-0,39	56	44
Мишиха	0,19-0,22	84	16	0,23-0,25	52	48	0,12-0,31	40	60	0,18-0,34	47	53

фосфора в водотоках увеличилась вместе с ростом туристического потока (1241 тыс.) в пос. Листвянка. В воде притоков юго-западного побережья концентрации Р_{общ} выше в 3-17 раз, чем на юго-восточном побережье озера. Для сравнения, содержание данного компонента в воде р. Селенги (основного притока озера) в период 2010-2016 изменялось от 31 мкг/дм³ осенью до 84 мкг/дм³ весной, при среднемноголетнем значении 59 мкг/дм³ (Таблица 4). Эти концентрации сопоставимы с таковыми в ручьях пос. Листвянка (Таблица 6). В воде р. Крестовка среднегодовые концентрации были в 3 раза.

Динамика содержания общего азота в воде притоков пос. Листвянка представлена на Рисунке 5. Отмечено снижение концентраций в воде водотоков по сравнению с 2019 г., что может быть связано со снижением туристической активности. В 2021 г. продолжилось снижение содержания N_{общ} в ручьях Бол. и М. Черемшанка. Как и для общего фосфора, в основном наблюдается рост содержания N_{общ} вниз по течению реки. В ручьях Бол. и М. Черемшанка от

верхнего течения к устью содержание N_{общ} возрастает от 5 до 10 раз, а в воде р. Крестовка его концентрация по течению реки изменяется незначительно, к устью возрастает в 1,5 раза, руч. Каменушка в 2 раза, но не во все годы. По результатам исследования подземных вод в пос. Листвянка также выявлено снижение концентраций нитратного азота в воде за период 2018–2021 гг. Авторы связывают это как с ростом количества атмосферных осадков в регионе, что привело к повышенному питанию грунтового водоносного горизонта и поднятию зеркала грунтовых вод, так и с устранением техногенных источников загрязнения грунтовых вод (Алексеева и др., 2023А).

По течению ручьев наблюдается не только увеличение концентрации общего фосфора и азота, но и изменение формы их нахождения (Таблица 6) Так во всех ручьях к устью возрастает доля минеральных форм фосфора и азота. В воде водотоков М. и Бол. Черемшанка N_{мин} представлен на 91% и 98% нитратным азотом, соответственно. Для вод р. Крестовка на долю нитратного азота приходится

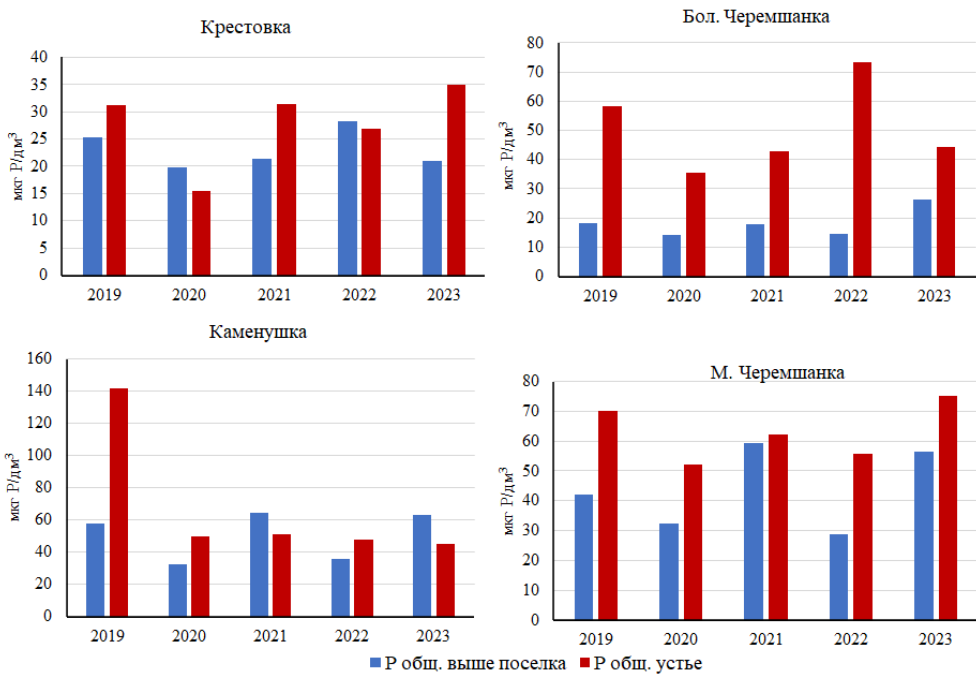


Рис.4. Межгодовая динамика содержания общего фосфора в воде притоков юго-западного побережья оз. Байкал, 2019-2023 гг.

Таблица 6. Содержание разных форм фосфора и азота в воде притоков юго-западного побережья оз. Байкал, 2019-2023 гг. В числителе - размах концентраций, в знаменателе среднее содержание за период наблюдения.

Водотоки	Диапазон концентраций	% от Р _{общ}		Диапазон концентраций	% от N _{общ}	
	Р _{общ} , мкг /дм ³	Р _{мин}	Р _{орг}	N _{общ} , мг/дм ³	N _{мин}	N _{орг}
Бол. Черемшанка, выше поселка	<u>1-62</u> 15	37	63	<u>0,12-2,57</u> 0,74	59	41
Бол. Черемшанка, устье	<u>5-221</u> 52	71	29	<u>0,5-28</u> 3,15	78	22
М. Черемшанка, выше поселка	<u>3-140</u> 31	41	59	<u>0,12-2,56</u> 0,66	28	72
М. Черемшанка, устье	<u>5-400</u> 71	66	44	<u>0,23-14</u> 2,87	70	30
Крестовка, выше поселка	<u>3-74</u> 18	40	60	<u>0,05-3</u> 0,40	31	69
Крестовка, устье	<u>3-190</u> 19	39	61	<u>0,15-4</u> 0,60	45	55
Каменушка, выше поселка	<u>11-190</u> 38	60	40	<u>0,19-5,57</u> 0,72	55	45
Каменушка, устье	<u>16-235</u> 70	71	29	<u>0,18-4,68</u> 1,20	65	35

79%, аммонийного - 20% от общего содержания N_{мин}, для вод р. Каменушка - 75 и 24 %, соответственно.

В воде притоков юго-западного побережья концентрации N_{общ} выше в 2-10 раз, чем на юго-восточном побережье озера.

Определение общего азота в воде притоков юго-западного побережья оз. Байкал ранее не проводилось, поэтому сравнивается содержание нитратов, как составляющего компонента минерального азота. Для р. Крестовка в 1950-1955 годы содержание азота нитратного изменялось от 0 до 0,14 мг/дм³ при среднем значении 0,05 мг/дм³ (Вотинцев и др., 1965). В 2007-2012 гг. концентрации дан-

ного компонента были выше, 0,02 – 0,23 мг/дм³, в среднем составляя 0,08 мг/дм³ (Загорулько и др., 2014). В 2019-2023 гг. размах колебаний составил 0,02-1,01 мг/дм³. Среднее значение концентраций нитратов было в 5 и 3 раза соответственно выше, чем 70 и 10 лет назад. Для руч. Бол. Черемшанка в 1950-1955 годы содержание нитратов колебалось в диапазоне 0,02-0,81 мг/дм³, среднее значение составило 0,33 мг/дм³. В 2019-2023 гг. концентрация рассматриваемого компонента варьировала от 0,18 до 5,4 мг/дм³. Среднее значение было в 6 раз выше, чем в 1950-е годы.

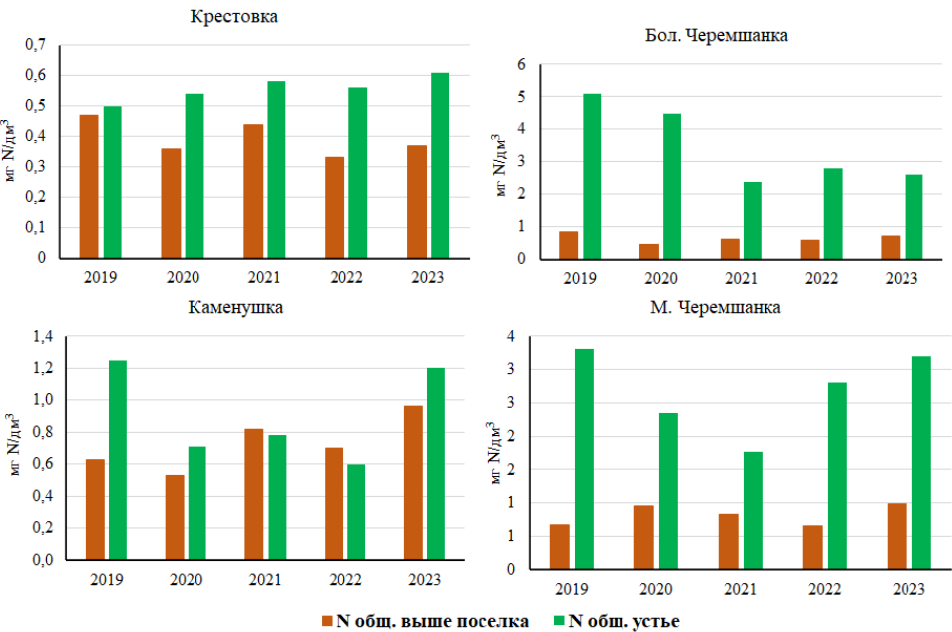


Рис.5. Межгодовая динамика содержания общего азота в воде притоков юго-западного побережья оз. Байкал, 2019-2023 гг.

4. Заключение

Таким образом, комплексная оценка состояния воздушной и водной среды в бассейне Южного Байкала, основанная на многолетнем исследовании речных и снеговых вод, позволила сделать заключение о факторах формирования химического состава вод притоков оз. Байкал на юго-западном и юго-восточном побережьях, выявить причины, влияющие на пространственную и временную динамику концентраций общего фосфора и азота в снеговых и речных водах, количественно оценить уровни накопления N и P в снежном покрове изучаемых территорий.

В сравнении с юго-восточным побережьем содержание $N_{\text{общ}}$ на юго-западном побережье Байкала в 1,6 раз выше, что связано с большей антропогенной нагрузкой на воздушную среду в поселке Листвянка. Среднемноголетняя концентрация $P_{\text{общ}}$ в снежном покрове юго-западного побережья в 2,3 раза выше, чем на юго-восточном побережье. С 1980-х годов поступление $N_{\text{общ}}$ из атмосферы на акваторию Байкала увеличилось в среднем в 1,5 р, поступление $P_{\text{общ}}$ значительно не изменилось.

На юго-восточном побережье озера в водах притоков, вследствие их большего водного стока и меньшей антропогенной нагрузки на их водосборный бассейн, определены низкие концентрации общего фосфора и азота. Изменение содержания в разные годы обусловлено в основном климатическими изменениями регионального характера. Сезонная динамика концентраций азота и фосфора для этих рек в основном связана с естественными процессами, происходящими в водоемах.

На юго-западном побережье на формирование химического состава вод притоков озера и снежного покрова большое влияние оказывает антропогенный фактор. Содержание общего фосфора и азота в воде вниз по течению рек на территории пос. Листвянка увеличивается, в снежном покрове на устьевых участках происходит возрастание концентраций в 2-4 раза.

Из всех проанализированных водотоков в пос. Листвянка менее всего антропогенному влиянию подвержена р. Крестовка, имеющая наибольший водный сток, что способствует снижению концентраций загрязняющих веществ в воде вследствие их разбавления.

По межгодовой динамике содержания фосфора и азота в водотоках пос. Листвянка установлен прямой отклик туристической нагрузки на химический состав вод этого района. При ограничениях посещения туристами пос. Листвянка во время пандемии в 2020-2021 гг. содержание общего фосфора и азота в реках и снежном покрове снизилось.

При сравнении относительного состава речных вод двух побережий Южного Байкала отмечено преобладание минеральных форм азота и фосфора в устьевых участках рек юго-западного побережья, что можно считать показателем влияния человеческой деятельности на процессы формирования вод. В речных водах юго-восточного побережья преобладают органические формы фосфора, что может быть

показателем естественных процессов на водосборе рек.

В водах изучаемых притоков произошло увеличение концентраций нитратного азота в современный период. Увеличилось поступление из атмосферы общего азота на акваторию озера Байкал.

Благодарности

Исследование выполнено по теме Государственного задания ЛИН СО РАН № 0279-2021-0014 (121032300199-9).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Khodzher T.V., Domysheva V.M., Sorokovikova L.M. et al. 2016. Part II. Method and case studies for understanding and monitoring the landscapes of Siberia. Chapter 3. Methods for monitoring the chemical composition of Baikal water. In: Mueller L. et al. (Eds.), *Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia*. Cham, pp. 113-132. DOI: [10.1007/978-3-319-24409-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24409-9_3)
- Kravtsova L.S., Izboldina L.A., Khanaev I.V. et al. 2014. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal. *Great Lakes Research* 40: 441-448.
- Malnik V., Masumi Y., Tomberg I. et al. 2022. Lacustrine, wastewater, interstitial and fluvial water quality in the Southern Lake Baikal region. *Journal of Water and Health* 20(1): 23-40. DOI: [10.2166/wh.2021.064](https://doi.org/10.2166/wh.2021.064)
- Obolkin V.A., Molozhnikova E.V., Shikhovtsev M.U. et al. 2021. Sulfur and nitrogen oxides in the atmosphere of Lake Baikal: sources, automatic monitoring, and environmental risks. *Atmosphere* 12(1348): 1-10. DOI: [10.3390/atmos12101348](https://doi.org/10.3390/atmos12101348)
- Onishchuk N.A., Tomberg I.V., Khodzher T.V. 2022. Features of Interannual Dynamics of the Hydrochemical Parameters of Baikal Tributaries near the Village of Listvyanka. *Geography and Natural Resources* 43: 50-55. DOI: [10.1134/S1875372822050158](https://doi.org/10.1134/S1875372822050158)
- Shikhovtsev M.Y., Obolkin V.A., Molozhnikova E.V. 2022. Dependence of the concentration of small gas impurities in the air basin of the Southern Baikal region on synoptic and meteorological conditions according to the Listvyanka station. *Proceedings of SPIE* 12341: 1-7. DOI: [10.1117/12.2643498](https://doi.org/10.1117/12.2643498)
- Sorokovikova L.M., Netsvetaeva O.G., Tomberg I.V. et al. 2020. Monitoring of the snow cover chemical composition and its role in the acidification of the southern Baikal tributaries. *Proceedings of SPIE* 11560: 1-10. DOI: [10.1117/12.2574786](https://doi.org/10.1117/12.2574786)
- Sorokovikova L.M., Netsvetaeva O.G., Tomberg I.V. et al. 2021. Snow cover as a factor of impact on the chemical composition of the Pereemnaya River water (South-Eastern coast of Baikal). *Proceedings of SPIE* 11916: 1-8. DOI: [10.1117/12.2602049](https://doi.org/10.1117/12.2602049)
- Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M. et al. 2016. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? *Journal of Great Lakes Research* 42: 487-497. DOI: [10.1016/j.jglr.2016.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011)
- Wetzel R.G., Likens G.E. 2000. *Limnological analyses*. New York: Springer.

- Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Алексеев В.Р. и др. 2016. Гидрогеологические условия поселка Листвянка. *География и природные ресурсы* 6: 32-36. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(32-36\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(32-36))
- Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Шолохов П.А. и др. 2018. Качество подземных и поверхностных вод в районе пос. Листвянка (юго-западное побережье оз. Байкал). *География и природные ресурсы* 4: 105-114. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2018-4\(105-114\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(105-114))
- Алексеева Л.П., Алексеев С.В. 2023. Нитратное и аммонийное загрязнение грунтовых вод в пос. Листвянка на оз. Байкал. *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле* 46: 3-15. DOI: [10.26516/2073-3402.2023.46.3](https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.46.3)
- Алексеева Л.П., Алексеев С.В., Шолохов П.А. и др. 2023. Мониторинг качества подземных вод в поселке Листвянка (юго-западное побережье озера Байкал). *Geodynamics & Tectonophysics* 14(2). 1-11. DOI: [10.5800/GT-2023-14-2-0697](https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-2-0697)
- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике. 2017. Лазовик П.А., Ефременко Н.А. (Ред.). Санкт-Петербург: Нестор-История.
- Атлас озера Байкал. 1993. В: Галазий. Г.И. (Ред.). Москва: Роскартография.
- Воробьева И.Б., Власова Н.В., Гагаринова О.В. и др. 2016. Современное состояние территории поселка Листвянка по данным анализа растительности, поверхностных вод и снежного покрова. *География и природные ресурсы* 6: 93-98. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(93-98\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(93-98))
- Воробьева И.Б., Власова Н.В., Напрасникова Е.В. 2017. Оценка экологического состояния водных объектов байкальской природной территории (юго-западное побережье озера Байкал, поселок Листвянка). *Вода: Химия и Экология* 6: 86-93.
- Вотинцев К.К., Глазунов И.В., Толмачева А.П. 1965. *Гидрохимия рек бассейна озера Байкал*. Москва: Наука.
- Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2022 году». 2023. Иркутск: ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН.
- Загорулько Н.А., Гребенщикова В.И., Скларова О.А. 2014. Многолетняя динамика химического состава вод реки крестовки (приток озера Байкал). *География и природные ресурсы* 3: 76-82.
- Костюкова М.С. 2022. Современное эколого-геохимическое состояние малых притоков озера Байкал (на примере поселка Листвянка). *Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология* 4: 118-125. DOI: [10.17308/geo/1609-0683/2022/4/118-125](https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/4/118-125)
- Нечаева Е.Г., Белозерцева И.А., Напрасникова Е.В. и др. 2010. Мониторинг и прогнозирование вещественно-динамического состояния геосистем сибирских регионов. Новосибирск: Наука.
- Напрасникова Е.В., Воробьева И.Б., Власова Н.В. и др. 2007. Санитарно-экологическая оценка воды колодцев на побережье Байкала (п. Листвянка). *Сибирский медицинский журнал* 8: 6-8.
- Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2022 год. 2023. Москва.
- Оболкин В.А. 1989. Режим и распределение атмосферных осадков на хр. Хамар-Дабан. *Климат и растительность Южного Прибайкалья*. Новосибирск: Наука.
- Оболкин В.А., Ходжер Т.В. 1990. Годовое поступление из атмосферы сульфатов и минерального азота в регионе оз. Байкал. *Метеорология и гидрология* 7: 71-76.
- Сорокикова Л.М., Синюкович В.Н., Нецветаева О.Г. и др. 2015. Химический состав снеговых и речных вод юго-восточного побережья озера Байкал. *Метеорология и гидрология* 5: 17-83.
- Сорокикова Л.М., Томберг И.В., Синюкович В.Н. и др. 2018. Фосфор в воде р. Селенги и его вынос в оз. Байкал в условиях низкой водности. *География и природные ресурсы* 39(4): 88-94. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2018-4\(88-94\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(88-94))
- Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В. и др. 2016. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали озера Байкал (акватория пос. Листвянка). *География и природные ресурсы* 6: 43-54. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(43-54\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(43-54))
- Чебунина Н.С., Онищук Н.А., Нецветаева О.Г. и др. 2018. Динамика содержания минеральных форм азота в водотоках и атмосферных осадках поселка Листвянка (Южный Байкал). *Известия ИГУ. Серия «Науки о Земле»* 24: 124-139. DOI: [10.26516/2073-3402.2018.24.3](https://doi.org/10.26516/2073-3402.2018.24.3)
- Янчук М.С., Воробьева И.Б., Власова Н.В. 2021. Геоэкологическая оценка состояния снега и льда на южном побережье озера Байкал. *Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология* 3: 59-68.