

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ МОДУЛЯ ХИМИЧЕСКОГО СТОКА РЕК БАССЕЙНА ЛЕНЫ В 2010–2019 ГОДАХ<sup>1</sup>

© 2023 г. Р. Г. Джамалов<sup>а</sup>, К. Г. Власов<sup>а</sup>, К. Г. Галагур<sup>а</sup>, Т. И. Сафронова<sup>а</sup>\*, В. Ю. Григорьев<sup>а, б</sup>, В. А. Ефимов<sup>б</sup>, О. С. Решетняк<sup>с</sup>, А. С. Оботуров<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

<sup>б</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, 119991 Россия

<sup>с</sup>Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

\*e-mail: tisafr@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.10.2021 г.

После доработки 25.06.2022 г.

Принята к публикации 04.10.2022 г.

Представлены результаты анализа пространственно-временной изменчивости содержания наиболее информативных гидрохимических компонентов за два периода (2010–2014 и 2015–2019 гг.) в бассейне р. Лены в соответствии с существующими наиболее жесткими нормативами для водоемов рыбохозяйственного использования. Построенные карты среднемноголетнего модуля стока данных компонентов позволяют дать пространственно-временную характеристику качества водной среды и выявить динамику изменений гидрохимического стока за последние годы. Также рассмотрено влияние климата на режим поверхностных вод бассейна Лены. Выявлено, что модуль стока большинства растворенных веществ, прежде всего основных ионов и биогенов, увеличивается при росте сумм осадков и уменьшается при росте температуры, при этом влияние осадков более заметно. Влияние температуры на химический сток заметнее проявляется на реках с преимущественно снеговым питанием, а влияние осадков – на реках с дождевым питанием.

*Ключевые слова:* речной сток, ионный сток, сток биогенных и органических веществ, загрязнение, химический состав, качество воды.

**DOI:** 10.31857/S0321059623020062, **EDN:** LZRWGY

### ВВЕДЕНИЕ

Реки по всему миру испытывают возрастающую антропогенную нагрузку, что не только ограничивает их хозяйственное использование, но и оказывает негативное влияние на водные экосистемы. Помимо прямого воздействия хозяйственной деятельности на химический сток (сброс сточных вод, строительство прудов и водохранилищ, изменение русловой сети) существует и опосредованное, включающее в себя и влияние глобального изменения климата. Так, IPCC 6 оценило вероятность наличия связи между ухудшением качества водных ресурсов и глобальным изменением климата как умеренную (“medium”).

Величина химического стока на водосборе зависит от трех ключевых факторов: наличия ис-

точника растворенных веществ, условий для их мобилизации и транспортировки [14]. Изменение климата влияет главным образом на последние два фактора, причем это влияние может иметь не монотонный характер. Рост речного стока сопровождается ростом интенсивности и частоты поступления воды на поверхность водосбора, что способствует попаданию в потоки растворенного и взвешенного материала. В частности, это характерно для биогенных веществ. В то же время при отсутствии поступления воды прекращается диффузный сток с некоторых территорий, которые могли отличаться большим весовым вкладом в сток отдельных компонентов. Однако при дальнейшем поступлении воды на водосбор концентрация растворенных веществ может падать в результате их разбавления. Для компонентов, поступающих в реки с подземными водами, рост водности может привести не только к снижению их концентрации, но и к снижению модуля стока из-за особенностей гидравлической связи между рекой и подземными водами.

<sup>1</sup> Работа проводилась в рамках научной программы Института водных проблем (проект FMWZ-2022-0001), в рамках инициативной научной работы совместно с Гидрохимическим институтом. Анализ связи между химическим стоком и климатическими факторами проводился в рамках проекта РНФ 21-17-00181.

Среди параметров водного режима рек, непосредственно зависящих от изменчивости климата и оказывающих наиболее заметное влияние на химический состав речных вод, выделяется расход воды и ее температура.

Так, на большинстве исследуемых постов на территории США была установлена связь между водным стоком и по крайней мере стоком одного из компонентов [17]. Подобные связи выявлены и на территориях России [12], Финляндии [10] и части Австралии [13]. Следует отметить, что отдельные факторы играют существенную роль лишь для определенных территорий. Так, для Финляндии это рН, а для Австралии – влажность почвы. Особенность стока рек в зоне вечной мерзлоты в условиях ее таяния – рост содержания основных ионов, особенно  $\text{SO}_4^{2-}$  [18]. Вместе с тем рост температуры воды при прочих равных условиях ведет к росту скорости разложения гуминовых веществ [16]. Наиболее однозначное влияние, независимо от особенностей реки и ее водосбора, рост температуры оказывает на кислородный режим – рост в зимний период за счет уменьшения периода ледостава и снижение в летний период за счет снижения концентрации насыщения воды кислородом в более теплой воде.

Рост температуры воды р. Лены на замыкающем створе с. Кюсюр за май–октябрь 1991–2012 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. составил  $0,6^\circ\text{C}$ , что соответствует снижению насыщенной концентрации кислорода на ~2% [1].

Бассейн Лены – один из самых обеспеченных ресурсами пресных вод. Но даже при высокой водности реки наблюдаются отклонения от нормативов по отдельным гидрохимическим показателям качества воды, когда содержание химических веществ может превышать ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения.

Качество воды р. Лены формируется под влиянием естественных (природно-климатических) и антропогенных факторов. Основное антропогенное воздействие на речные воды в бассейне происходит за счет поступления недостаточно очищенных сточных вод промышленных предприятий, смыва минеральных удобрений и органических веществ с сельхозугодий и животноводческих ферм, влияния маломерного флота, безвозвратного изъятия воды на промышленные нужды, а также транзитного переноса загрязненных вод вниз по течению реки [6].

Существенно и влияние стихийных природных гидрологических явлений в бассейне р. Лены (заторы, наводнения, летние паводки и др.), а также диффузное загрязнение рек, доля которого, по разным подсчетам, может достигать 50% от общего поступления загрязняющих веществ в речную сеть. В связи с этим становится актуальным рассмотрение водного и химического стока в

бассейне Лены, их взаимосвязи в современных условиях антропогенного воздействия и на фоне климатических изменений в целом.

Цель данной работы – анализ пространственного распределения химического стока и отдельных его компонентов в бассейне Лены, а также оценка влияния изменчивости среднегодовой температуры воздуха и количества осадков на химический сток.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### *Район изучения*

Бассейн Лены находится в трех климатических поясах: арктическом, субарктическом и умеренном. Водосборная площадь бассейна составляет 2490000 км<sup>2</sup>. Верхнее течение Лены до впадения Витима, почти треть ее длины, приходится на горное Прибайкалье. В среднем течении в состав реки входят два крупнейших притока – Алдан и Витим. После их впадения река становится многоводной. В нижнем течении Лены (ниже устья Алдана) ее бассейн становится узким: с В подступают отроги Верхоянского хребта, с З – возвышенности Среднесибирского плоскогорья. Крупнейшие притоки – реки Витим, Олекма, Алдан и Вилой.

Для рек бассейна Лены характерно смешанное питание: дождевое, снеговое, тальными водами ледников, наледей, надмерзлотными и подмерзлотными подземными водами. В реках относительно равнинной части бассейна преобладает снеговое питание, в реках южной горной части, кроме верховьев Лены, – дождевое. Питание за счет дождевой и снеговой талой воды составляет ~50%, поэтому полноводность реки нерегулярна. Максимальный объем воды характерен для июня, минимальный наблюдается в апреле незадолго до вскрытия реки. Доля подземных вод в питании рек в районах сплошной многолетней мерзлоты обычно составляет несколько процентов, а в условиях островной мерзлоты достигает 35–45% годового стока [5]. В низовьях Лены 50% стока образуется от таяния снега, 35% – за счет дождевых осадков, а 15% поставляют подземные подмерзлотные воды [2]. Отличительная особенность бассейна Лены – приуроченность к зоне многолетнемерзлых пород. Сезонно-талый слой – индикатор состояния многолетнемерзлых грунтов, отражающий метеорологические условия в отдельные годы. Мощность сезонно-талого слоя в бассейне Лены меняется от 0.5 до 5.0 м, что определяется широтой местности, физико-географическими и геокриологическими характеристиками конкретной территории. Еще одна важная особенность бассейна Лены – сильная заболоченность территории.

### Материалы

В работе использованы данные по 64 гидрохимическим постам. Из них 36 отобрано для расчетов модулей гидрохимического стока. Количество постов с гидрологическими данными составляет 29. Медианная площадь водосбора — 30349 км<sup>2</sup>. Площадь варьировала от 134 (р. Шестаковка) до 229677 км<sup>2</sup> (р. Лена).

Число гидрохимических измерений в год на постах рек Лены, Алдан и Витим варьирует от 6 до 16. Наибольшее количество измерений проводилось для ХПК, БПК<sub>5</sub> и нефтепродуктов на посту д. Хабарова — 36 измерений в год. Притоки Лены менее изучены, на них проводятся 3–4 измерения в год. Средняя продолжительность измерений составляет 7 лет.

Источником данных о температуре воздуха и количестве осадков послужил реанализ ERA5 [14]. Атмосферный реанализ предполагает использование результатов наземных и спутниковых наблюдений в процессе усвоения данных в моделях, что позволяет сочетать в итоговом продукте достоинства различных источников данных. ERA5 (ECMWF Re-Analysis 5) представляет собой продукт пятого поколения, использующий четырехмерную вариационную ассимиляцию данных наблюдений и отличающийся достаточно высокой точностью на территории России [3].

### Методы

Для расчета химического стока среднемесячные концентрации (мг/дм<sup>3</sup> и мкг/дм<sup>3</sup>) умножались на расходы воды за соответствующий период (м<sup>3</sup>/с). Полученные значения делили на площадь частного водосбора (км<sup>2</sup>) и получали модули стока. Пропуски в рядах концентраций заменялись среднесезонными величинами за соответствующий месяц. Концентрации в зимний сезон в связи с редкими наблюдениями также определялись интерполяцией по времени при условии, что крайние точки относятся к зимней межени. С учетом малой водности рек в период зимней межени допускаем, что эта интерполяция не привела к существенному росту ошибки при расчете модуля химического стока.

Модуль водного стока рассчитывался либо интерполяцией между постами при предположении, что величина расхода между постами меняется пропорционально изменению площади водосбора, либо, если в бассейне отсутствовали измерения водного стока, интерполяцией между водосборами.

Рассчитанные таким образом величины модуля химического стока имеют ошибку, обусловленную рядом факторов. Во-первых, это недостатки методики отбора и анализа проб. Во-вто-

рых, это малое количество измерений, а также иногда полное отсутствие измерений в зимний период по ряду компонентов. В-третьих, это ошибки определения модуля водного стока в створе гидрохимического поста. В-четвертых, это ошибки измерения расходов воды — они существенны для частных водосборов с небольшой площадью, относящихся к рекам с большим расходом воды, например нижнее течение Лены. В-пятых, это различное и не всегда достаточное количество точек измерений по ширине русла, колеблющееся от 1 до 3. На значительной части постов пробоотбор проводится не по всей ширине реки. Пробы, отбираемые с поверхностных горизонтов или на стрежне потока, могут быть недостаточно репрезентативны и не учитывать местные источники химических веществ или влияние тающей мерзлоты. Также отметим, что существующая сеть гидрологических постов имеет недостаточную регулярность и сосредоточена преимущественно вокруг хозяйственно-освоенных территорий [8].

В связи с короткими рядами наблюдений за концентрациями (2010–2019 гг.) анализ связи между климатическими факторами и химическим стоком проводился при осреднении как во времени, так и пространстве. Водосбор Лены был поделен на две области: с преимущественно снеговым и преимущественно дождевым питанием. Площадь зоны со снеговым питанием составила 1.6 млн, а с дождевым — 0.9 млн км<sup>2</sup>. Дождевое питание преобладает в южной и восточной частях бассейна, в основном в бассейне Алдана.

Для каждого водосбора и каждого компонента стока рассчитывался коэффициент ранговой корреляции Кендалла  $r$  [15]. В случае, если  $r > 0.4$ , считалось, что имеет место положительная связь, если  $r < -0.4$  — отрицательная; если  $r$  попадал в диапазон между от  $-0.4$  до  $0.4$ , то принималось, что связь отсутствует. При заданной длине ряда этой величине  $r$  соответствует величина  $p$ -value, равная 13.5% (получена методом статистических испытаний).

Далее в пределах каждого района с преимущественно снеговым или дождевым питанием из площади водосборов с положительной связью ( $r > 0.4$ ) вычиталась площадь водосборов с отрицательной связью ( $r < 0.4$ ). Эта разница делилась на площадь всего района и обозначалась как  $K_{пл}$ . Предлагается считать, что в этом районе связь устойчиво положительная или отрицательная, если  $0.2 > K_{пл}$  или  $K_{пл} < -0.2$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение среднегодовых значений температуры воздуха  $T$  (рис. 1а) и годового количества осадков  $P$  (рис. 1б) за 2010–2019 и 1980–2009 гг.

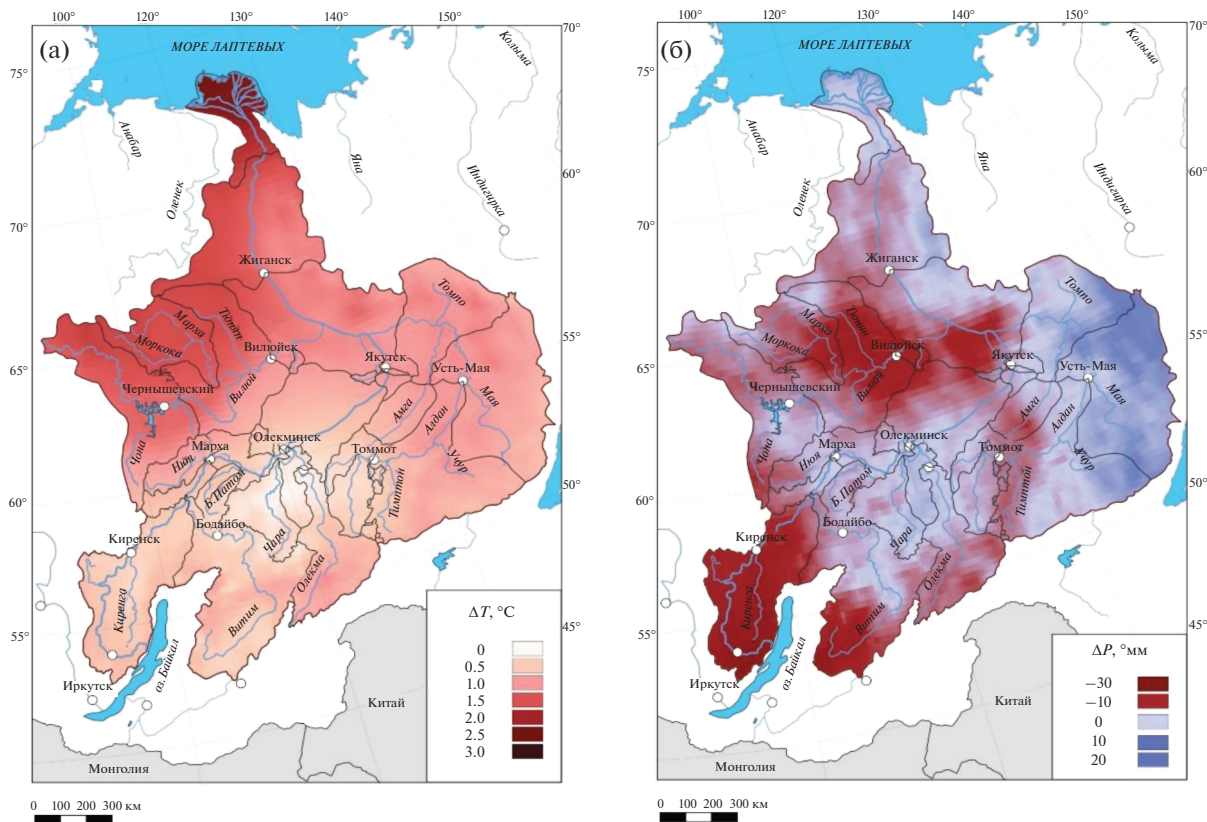


Рис. 1. а – аномалии среднегодовой температуры воздуха  $T$ , °С; б – количества осадков  $P$ , %, за 2010–2019 гг. относительно 1980–2009 гг.

показало, что первый период отличается положительными аномалиями  $T$  и близкими к норме величинами  $P$ .

Для большей части бассейна Лены рост  $T$  оказался  $\leq 1^\circ\text{C}$  и наименее выражен в бассейне р. Чары. В бассейне р. Вилюй рост уже составил порядка  $1.5^\circ\text{C}$ , а в дельтовой области он доходит до  $2.5^\circ\text{C}$ . Выявленные отрицательные аномалии  $P$  ( $< -10\%$ ) были выявлены в верховьях Лены и Витима, а также в центральной части бассейна Вилюя. Положительные аномалии не столь велики ( $< 10\%$ ) и приурочены в основном к западной части бассейна Лены.

**Концентрации**

В реках бассейна Лены минерализация значительно варьирует, достигая иногда значений чуть  $> 2000$  мг/л. Притоки Лены по содержанию анионов можно разделить на две группы: Вилюй, Тимптон и другие реки с концентрацией  $< 100$  мг/л (рис. 2а); Олекма, Алдан, Чара и другие реки с концентрацией  $> 100$  мг/л (рис. 2б). Наиболее высокая минерализация наблюдается в реках Нюе и Бирюк.

В целом, как показано ранее в [4], качество воды в бассейне р. Лены меняется от 2-го класса (“слабо загрязненная”) в верхнем течении до 4-го класса (“грязная”) на отдельных участках притоков (в населенных пунктах без организованного сброса сточных вод, что приводит к ухудшению качества воды). Такая напряженная ситуация отмечается на р. Олекме.

*Химический сток*

Изменчивость химического состава и водного стока рек в бассейне обуславливает неравномерность распределения химического стока по отдельным компонентам.

Легкоокисляемые органические вещества (по БПК<sub>5</sub>) – характерные загрязняющие вещества воды р. Лены. Наибольший модуль стока легкоокисляемых органических веществ отмечен на участке реки г. Олекминск – г. Якутск ( $1.5\text{--}2.0$  т/год с км<sup>2</sup>) за весь период наблюдений (рис. 3). В динамике наблюдается тренд на снижение стока, особенно в бассейне р. Алдан и на устьевом участке.

По содержанию трудноокисляемых органических веществ (по ХПК) также наблюдается незна-

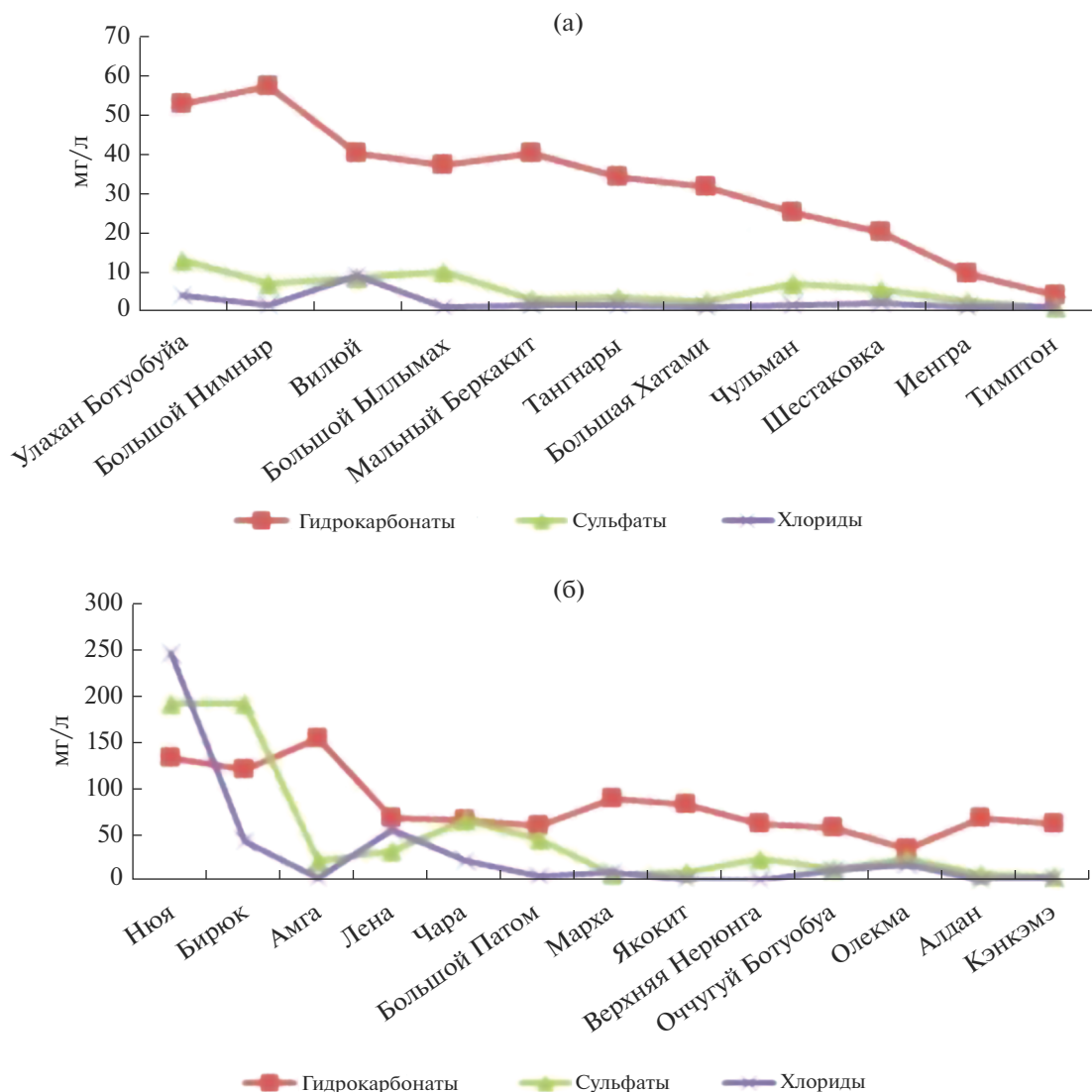


Рис. 2. Среднеголетнее содержание основных анионов в реках бассейна Лены (2010–2019 гг.).

чительная тенденция к снижению модуля стока, за исключением водосбора р. Олекмы (рис. 4).

Из основных притоков Лены наиболее высоким значением модуля стока трудноокисляемых органических веществ отличается р. Олекма (10–20 т/год с км<sup>2</sup>). В самой р. Лене наибольший модуль химического стока приурочен к участкам, подверженным влиянию загрязненных притоков: у г. Олекминска, пос. Покровск и г. Якутска (>25 т/год с км<sup>2</sup>).

Содержание в воде нефтепродуктов меняется следующим образом: наибольшее значение модуля в 2010–2014 гг. отмечено в верховьях реки, на участке от г. Олекминска до г. Якутска и в устьевой части с последующим снижением в период 2015–2019 гг. на данных участках (рис. 5).

Наибольшее за рассматриваемый период среднеголетнее значение модуля стока азота нитратного отмечено на реках Нюя и Большой Патом, а также в дельте р. Лены (>0.10 т/год с км<sup>2</sup>) (рис. 6). На всех остальных участках бассейна – ≤0.025 т/год с км<sup>2</sup>. В динамике прослеживается рост стока азота нитратного в среднем течении Лены.

В распределении модуля стока азота аммонийного отмечается наибольшее его значение на участках верхнего и среднего течения, в бассейне р. Алдан и в устье (рис. 7). Со временем наблюдается снижение модуля стока азота аммонийного на данных участках бассейна. В целом, тенденций изменения модуля стока азота нитритного не выявлено.

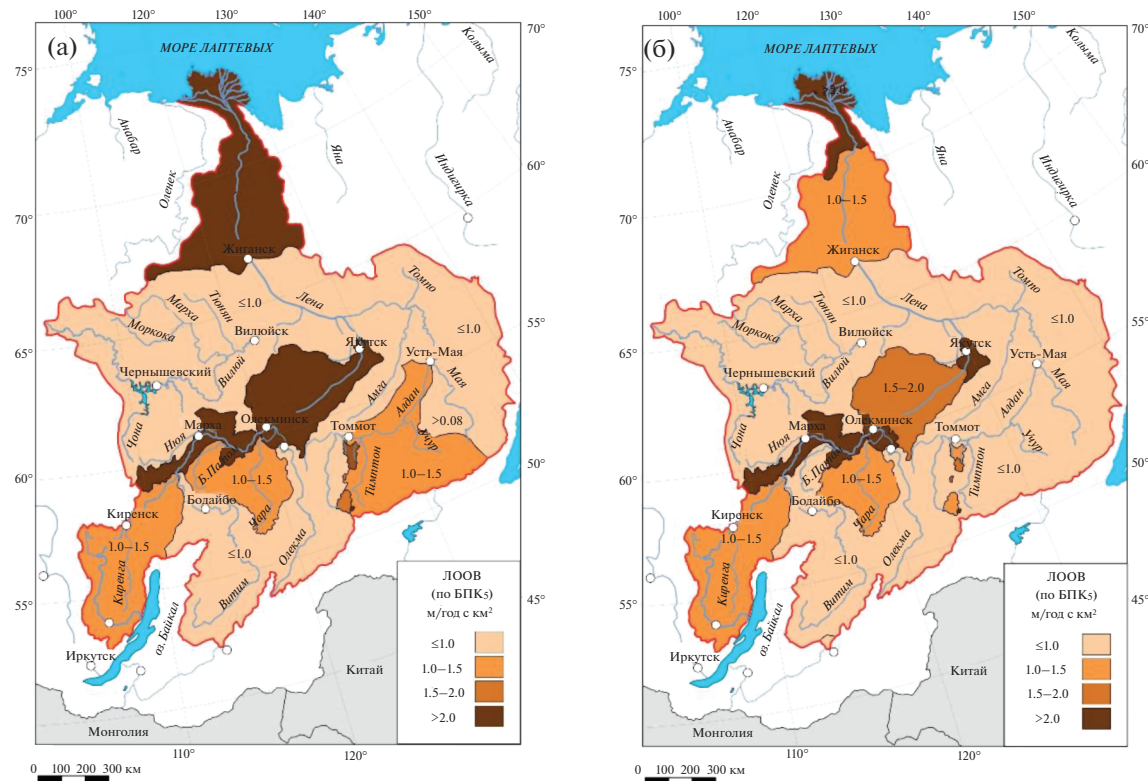


Рис. 3. Среднегодовой модуль стока легкоокисляемых органических веществ (ЛООВ) по БПК<sub>5</sub> в бассейне р. Лены за периоды: а – 2010–2014 гг.; б – 2015–2019 гг.

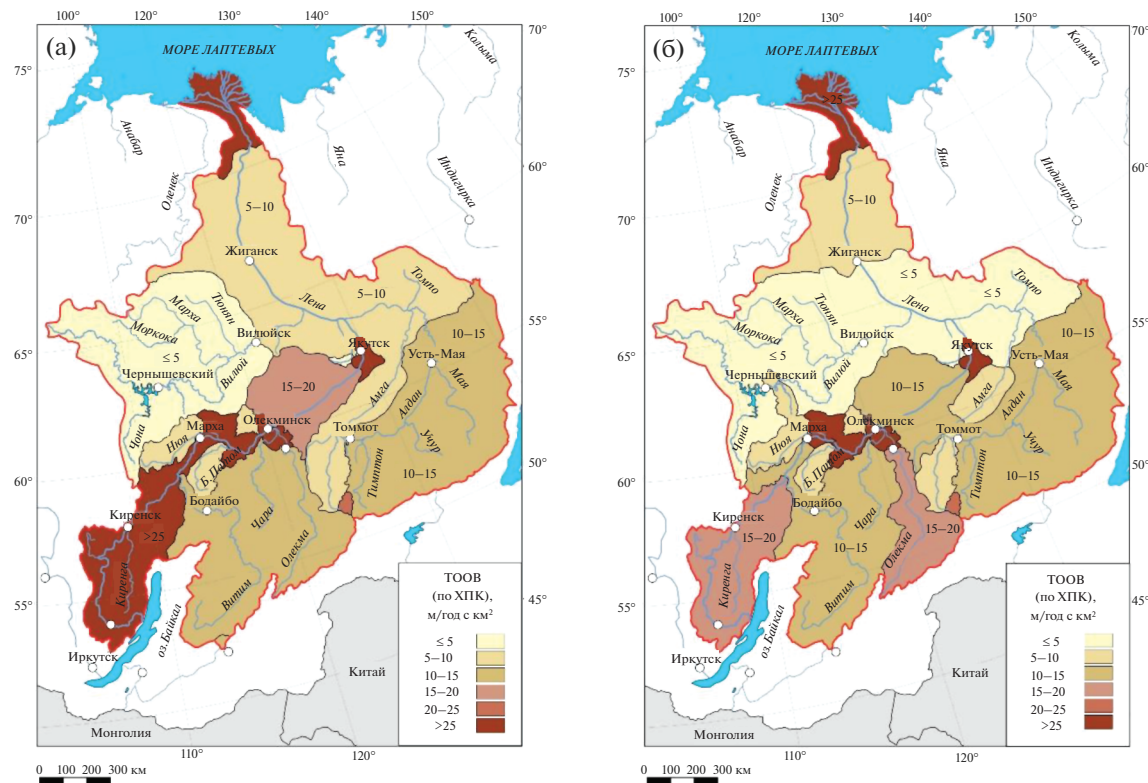


Рис. 4. Среднегодовой модуль стока трудноокисляемых органических веществ (по ХПК) в бассейне р. Лены за периоды: а – 2010–2014 гг.; б – 2015–2019 гг.

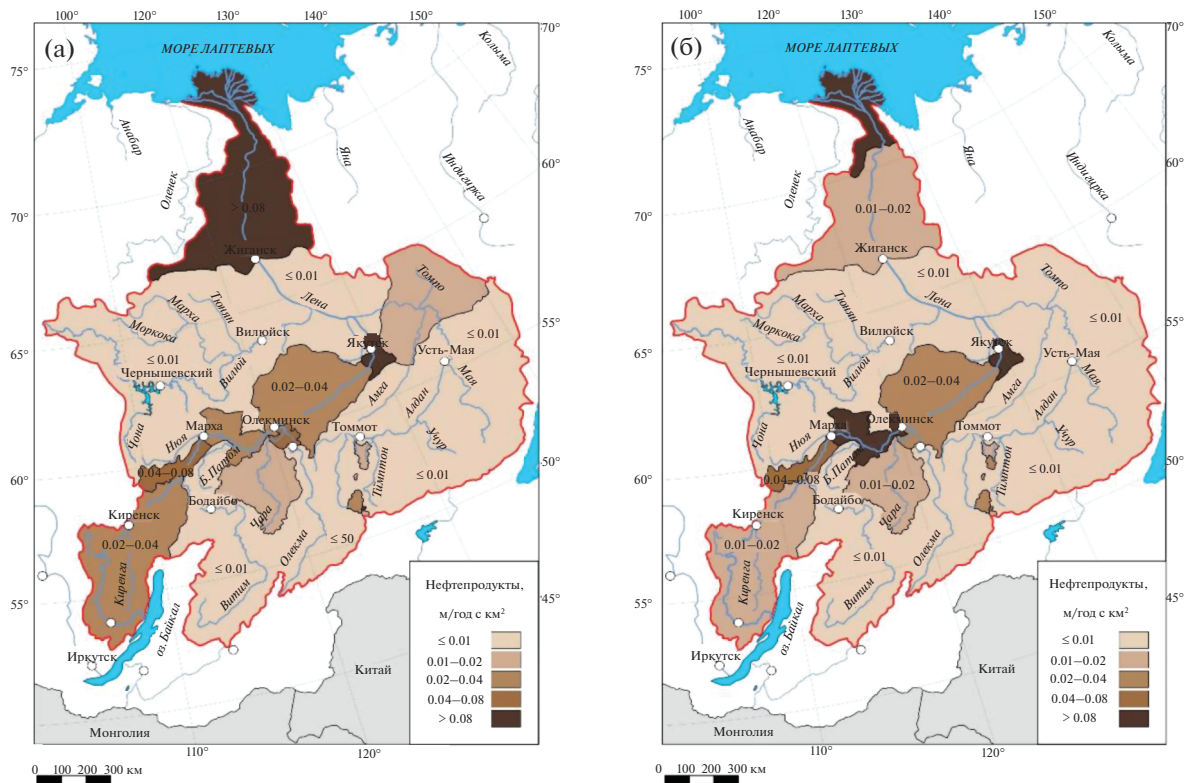


Рис. 5. Среднеголетний модуль стока нефтепродуктов в бассейне р. Лены за периоды: а – 2010–2014 гг.; б – 2015–2019 гг.

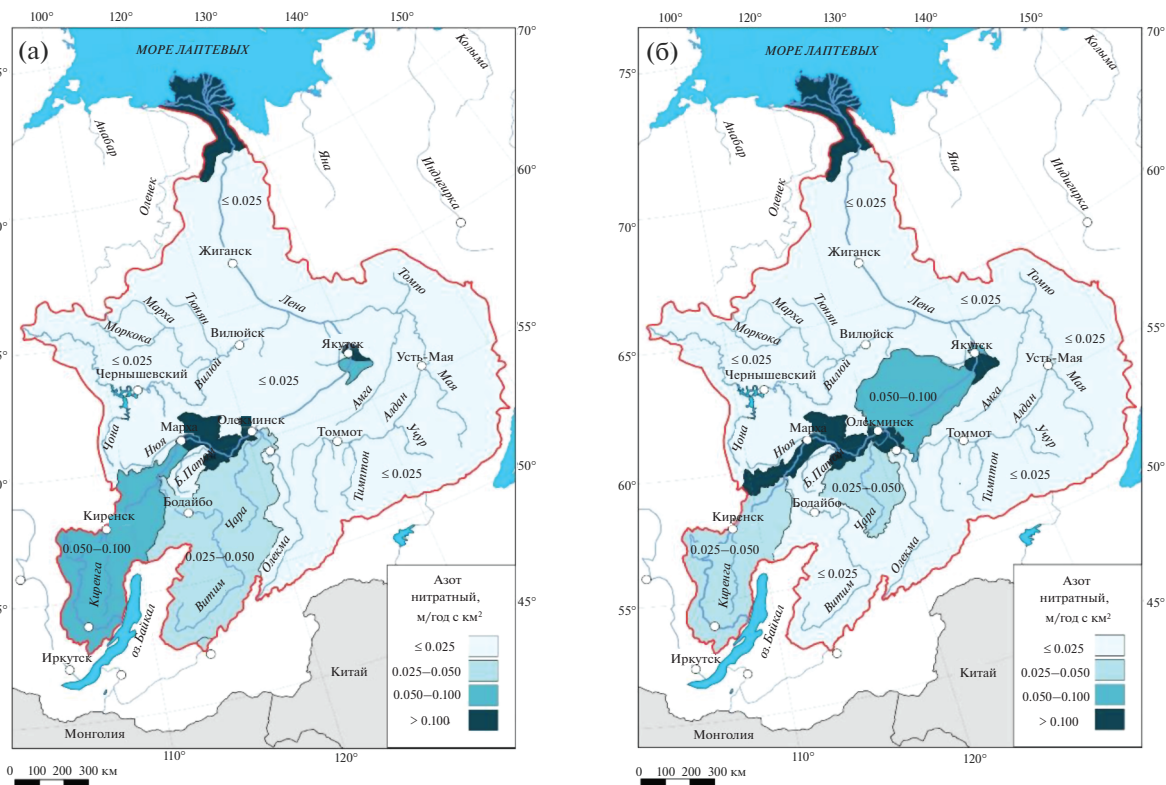


Рис. 6. Среднеголетний модуль стока азота нитратного в бассейне р. Лены за периоды: а – 2010–2014 гг.; б – 2015–2019 гг.

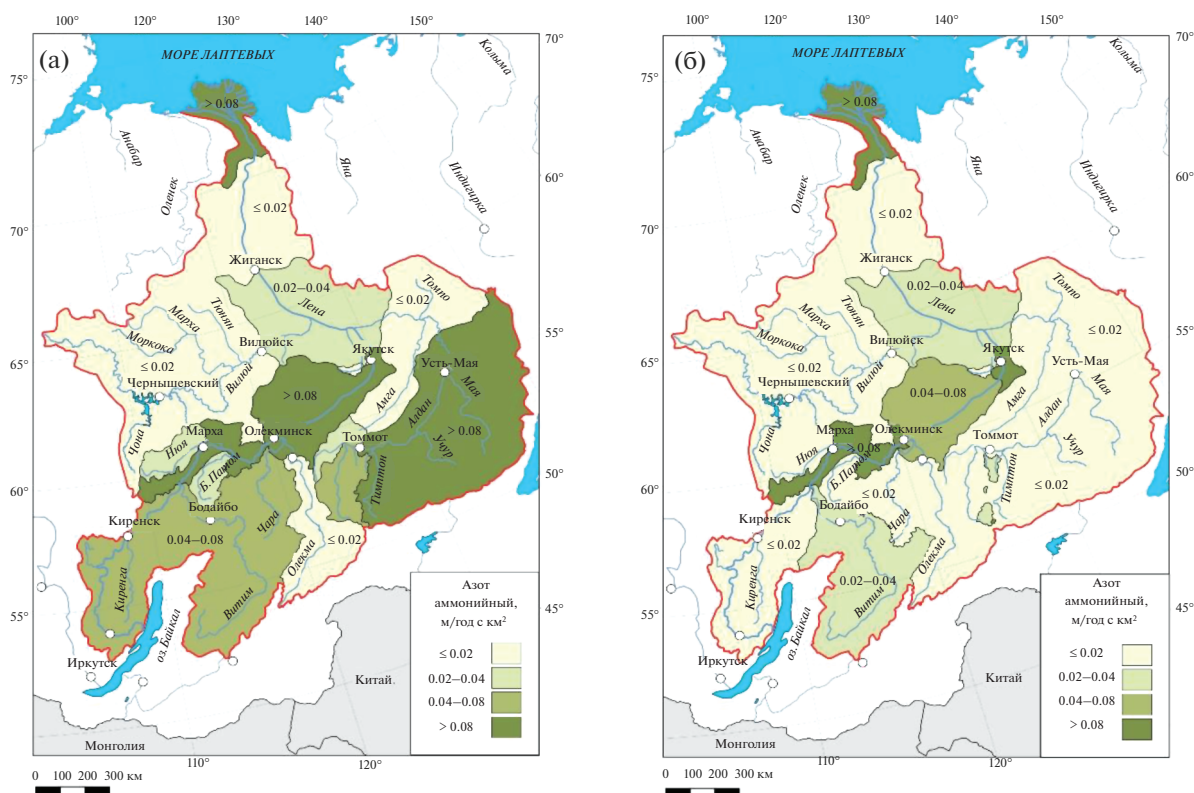


Рис. 7. Среднегодовой модуль стока азота аммонийного в бассейне р. Лены за периоды: а – 2010–2014 гг.; б – 2015–2019 гг.

Среднегодовой модуль стока соединений железа отличается значительной пространственно-временной изменчивостью — от 0.025 до 0.200 т/год с км<sup>2</sup>. Наибольшие значения модуля прослеживаются на участках от г. Мархи до г. Олёкминска, г. Якутска и в нижнем течении реки (рис. 8). Для отдельных водосборов характерен рост показателей стока железа (Вилюй, Нюя), для других, напротив, — снижение (Алдан и притоки в верхнем течении Лены — Киренга и Витим).

Наибольшие значения модуля стока соединений меди на уровне >1.5 кг/км<sup>2</sup> в год характерны для водосборов притоков верхнего течения, бассейна р. Алдан и устья (рис. 9). По содержанию меди в воде на этих речных участках наблюдается увеличение модуля во втором пятилетнем периоде.

#### *Связь компонентов химического стока с осадками и температурой воздуха*

Оценка влияния среднегодовой температуры воздуха и количества осадков на модуль химического стока и его отдельных компонентов приведена в табл. 1.

В районе с преимущественно дождевым питанием влияние температуры прослеживается лишь для некоторых основных ионов, особенно для

хлоридов и кальция, причем это связь отрицательная. В бассейнах со снеговым питанием рост температуры воздуха ведет также к снижению модуля стока биогенных (азота и кремния) и органических веществ.

В отличие от температуры связь осадков с модулем стока почти всех компонентов положительная, и она более четко прослеживается и заметнее на водосборах с преимущественно дождевым питанием.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные позволяют выявить некоторые закономерности формирования модуля химического стока.

При рассмотрении полученных карт модуля стока можно выделить 4 основных участка с повышенным потоком химических веществ. Это верховья р. Лены и ее притоки до г. Олёкминска, участок реки в районе г. Якутска, устье реки и бассейн р. Алдан. Остальная часть бассейна р. Лены достаточно слабо освоена и мало освещена гидрохимической информацией. При этом влияние городов (Вилюйск, Чернышевский) не отмечается. В районе г. Якутска сосредоточена значительная часть промышленных и сельскохозяй-



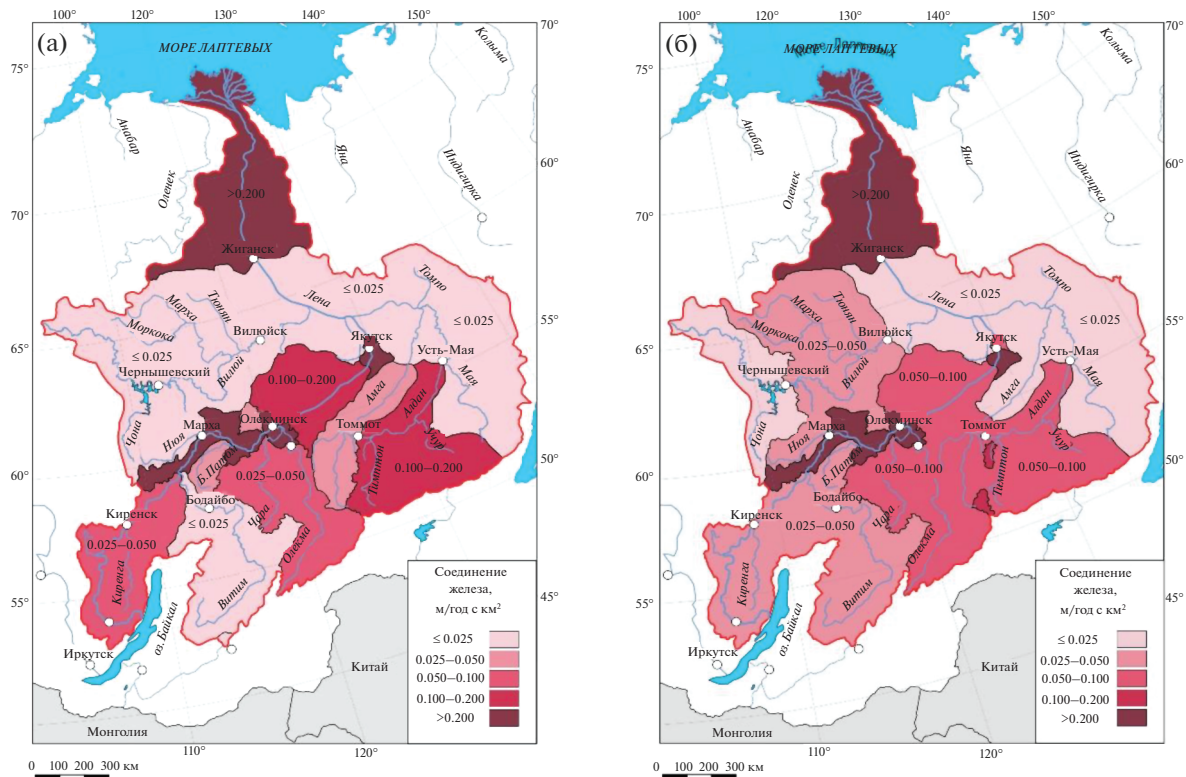


Рис. 8. Среднегодовой модуль стока соединений железа в бассейне р. Лены за периоды: а – 2010–2014 гг.; б – 2015–2019 гг.

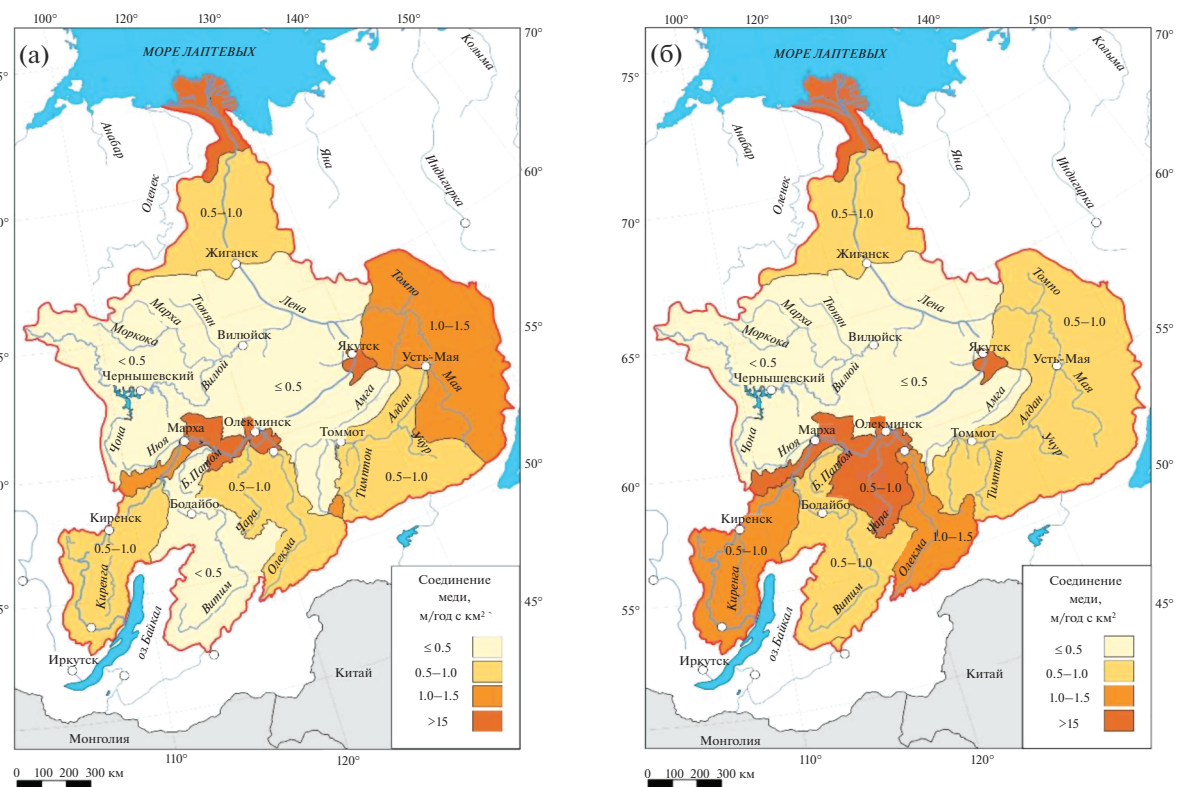


Рис. 9. Среднегодовой модуль стока соединений меди в бассейне р. Лены за периоды: а – 2010–2014 гг.; б – 2015–2019 гг.

**Таблица 1.** Величина  $K_{пл}$  для районов с преимущественно снеговым и дождевым питанием в бассейне Лены

Компонент	Температура		Осадки	
	дождевое	снеговое	дождевое	снеговое
Магний	-0.23	-0.57	0.77	0.22
Хлориды	-0.48	-0.11	0.39	0.37
SO <sub>4</sub>	-0.08	-0.11	0.52	0.09
Сумма ионов	-0.22	-0.40	0.77	0.24
HCO <sub>3</sub>	0.00	-0.54	0.77	0.25
Натрий	-0.22	-0.29	0.38	0.35
Калий	0.00	0.28	-0.22	0.03
Кальций	-0.48	-0.23	0.77	0.45
Бихроматная окисляемость	-0.13	-0.19	0.52	0.30
БПК <sub>5</sub>	0.09	-0.16	0.61	-0.08
Летучие фенолы	-0.01	-0.25	-0.12	0.06
Нефтепродукты	-0.13	-0.31	0.38	0.21
NH <sub>4</sub>	-0.01	-0.30	0.26	0.11
NO <sub>2</sub>	0.12	-0.21	0.22	0.15
NO <sub>3</sub>	0.00	-0.05	0.00	0.24
Фосфаты	0.00	-0.01	0.26	0.38
Кремний	-0.01	-0.30	0.78	0.58
P общий	0.14	-0.03	0.36	0.20
Железо общее	-0.13	-0.06	0.53	0.06
Медь	0.00	0.09	-0.25	0.19
Цинк	0.01	0.25	-0.22	0.02

ственных объектов Якутии [7]. Здесь в воды реки поступает наибольшее количество коммунально-бытовых стоков, сбросов с очистных сооружений и ливневых систем. В результате, по всем показателям в районе Якутска отмечаются повышенные модули стока.

На Лене выше г. Олёкминска, а также на правых притоках расположено значительное количество месторождений полезных ископаемых [9]. Эти месторождения обеспечивают приток микроэлементов-технофилов и шахтных вод. Разработка полезных ископаемых и увеличение транспортной нагрузки приводит к увеличению стока нефтепродуктов и тяжелых металлов (Fe, Cu, Zn). При этом вынос биогенных элементов снижается, вероятно, вследствие сокращения сбросов коммунально-бытовых и сточных вод. Наибольший модуль стока биогенных элементов приурочен к долине р. Лены, где сосредоточены основные сельскохозяйственные районы Якутии [7].

Бассейн р. Алдан также значительно освоен из-за добычи полезных ископаемых. Это выражено в повышенных модулях стока микроэлементов (Fe, Cu) и нефтепродуктов. При этом наблюдается тенденция к их уменьшению, вероятно, вслед-

ствие улучшения технологий очистки сбросов сточных вод и уменьшения антропогенного влияния. Поступление органических веществ и биогенных элементов связано с деградацией мерзлоты в бассейне, а также с выносом их с болот, расположенных в среднем и нижнем течении реки. Интересно уменьшение стока аммонийного азота в 2015–2019 гг. Вероятно, значительно снизилось влияние поселений, расположенных в среднем течении р. Алдан.

Устьевая область реки характеризуется повышенными значениями модуля стока всех рассматриваемых химических веществ. Это связано как с недостатками методики его оценки, так и с наиболее сильным влиянием глобального потепления на эту часть бассейна (рис. 1). В результате возникают предпосылки к деградации мерзлоты и выносу большого количества растворенных и взвешенных веществ [8, 11]. Кроме того, эта область бассейна (левый берег) значительно заболочена, что способствует поступлению мобильных форм Fe<sup>2+</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

Связь между модулем стока химических веществ и температурой воздуха слабо выражена ( $-0.4 \leq K_{пл} \leq 0.12$ ) (табл. 1). При этом достоверная связь

( $K_{пл} < -0.4$ ) отмечается для хлоридов и кальция в районах с преимущественно дождевым питанием и для магния и гидрокарбонатов в районах с преимущественно снеговым питанием. С ростом температуры наблюдается интенсификация таяния снега и льда, что приводит к уменьшению минерализации и, соответственно, поступления главных ионов.

В отличие от температуры, связь осадков с модулем стока почти всех компонентов положительная, и она более четко прослеживается и заметнее для водосборов с преимущественно дождевым питанием ( $0.52 \leq K_{пл} \leq 0.77$ ) (табл. 1). Вынос органических и биогенных веществ с водосбора во время выпадения осадков значительно больше, поскольку водосбор “подготовлен” — в летний период протаивает больший слой почвы. В основном химические вещества поступают в реку в период спада половодья.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

Изменения водного режима рек могут сказаться и на изменчивости химического стока с водосбора Лены. За период 2010–2019 гг. выявлены следующие изменения в химическом стоке:

для органических веществ и нефтепродуктов в динамике наблюдается тренд на снижение стока на водосборах отдельных притоков;

более значительно снизился сток ионов аммония, что может свидетельствовать о снижении антропогенной нагрузки в бассейнах рек (снижение объемов поступления сточных вод городов и поселков);

на фоне увеличения весенних осадков в бассейне Лены отмечается рост значений модуля стока азота нитратного, соединений железа и меди на водосборах отдельных притоков.

Выявлено, что модуль стока большинства растворенных веществ, прежде всего основных ионов и биогенных веществ, растет при росте величины осадков и уменьшается при росте температуры, при этом влияние осадков более заметно. Влияние температуры на химический сток сильнее проявляется на реках с преимущественно снеговым питанием, а осадков — на реках с дождевым питанием.

Изменчивость химического стока и взаимосвязь с климатическими изменениями может служить индикатором происходящих изменений в целом на водосборе реки. Важность таких исследований связана прежде всего с необходимостью оценки качества природных вод в бассейне реки Лены, играющих важнейшую роль в жизни населения и обеспечении его качественной питьевой водой.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Василенко А.Н., Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л.* Закономерности изменений среднегодовой температуры воды рек Арктической зоны России в связи с изменениями климата // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 8–22.
2. *Георгиади А.Г., Тананаев Н.И., Духова Л.А.* Внутригодовая изменчивость химического состава вод реки Лена (2018–2019 гг.) // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. Сб. докл. Международ. науч. конф. памяти Ю.Б. Виноградова. СПб.: СПбГУ, 2020. С. 579–583.
3. *Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Куреева М.Б., Степаненко В.М.* Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения слоя осадков реанализом ERA5 на территории России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. № 3. С. 435–446.
4. *Джамалов Р.Г., Решетняк О.С., Власов К.Г., Галагур К.Г., Оботуров А.С., Сафронова Т.И.* Особенности химического состава и качества воды в бассейне реки Лены // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 3 (87). С. 33–43.
5. *Никаноров А.М.* Региональная гидрохимия: Учебное пособие. Ростов-на-Дону: ОК, 2011. 388 с.
6. *Никаноров А.М., Брызгалов В.А., Решетняк О.С., Кондакова М.Ю.* Транспорт загрязняющих веществ по крупным рекам Европейского Севера и Сибири // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 3. С. 279–287.
7. *Присяжный М.Ю.* Территориальная организация хозяйства Якутии // Пространственная экономика. 2011. № 2. С. 33–53.
8. *Чалов С.Р.* Речные наносы в эрозионно-руслых системах: Дис. ... докт. геогр. наук. М.: МГУ, 2021. М.: 358 с.
9. *Школьный Д.И., Чалов С.Р., Ефимов В.А.* Инвентаризация россыпных разработок благородных металлов в бассейнах рек Дальнего Востока РФ: географическое распространение и воздействие на русловые системы // Современные проблемы географии и геологии. Материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием. Т. 1. Томск: ТГУ, 2017. С. 410–414.
10. *Asmala E., Carstensen J., Raïke A.* Multiple anthropogenic drivers behind upward trends in organic carbon concentrations in boreal rivers // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. № 12. P. 124018.
11. *Chalov S., Prokopenko K., Habel M.* North to south variations in the suspended sediment transport budget within large siberian river deltas revealed by remote sensing data // Remote Sensing. 2021. V. 13. № 22. P. 4549.
12. *Gandois L., Tananaev N.I., Prokushkin A., Solnyshkin I., Teisserenc R.* Seasonality of DOC Export From a Russian Subarctic Catchment Underlain by Discontinuous Permafrost, Highlighted by High-Frequency Monitoring // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2021. V. 126. № 10. P. e2020JG006152.
13. *Guo D., Lintern A., Webb J.A., Ryu D., Liu S., Bendemichl U., Leahy P., Wilson P., Western A.W.* Key Factors

- Affecting Temporal Variability in Stream Water Quality // *Water Resour. Res.* 2019. V. 55. № 1. P. 112–129.
14. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Quarterly J. Royal Meteorol. Society.* 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049.
  15. *Kendall M.G.* Rank Correlation Methods. 4th edition. London: Charles Griffin, 1975.
  16. *Lipczynska-Kochany E.* Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: A review // *Sci. Total Environ.* 2018. Vs. 640–641. P. 1548–1565.
  17. *Murphy J., Sprague L.* Water-quality trends in US rivers: Exploring effects from streamflow trends and changes in watershed management // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 656. P. 645–658.
  18. *Roberts K.E., Lamoureux S.F., Kyser T.K., Muir D.C.G., Lafrenière M.J., Iqaluk D., Pieńkowski A.J., Normandeau A.* Climate and permafrost effects on the chemistry and ecosystems of High Arctic Lakes // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. № 1. P. 1–8.