

# ГЕОХИМИЧЕСКИЙ СТОК АРКТИЧЕСКИХ РЕК НА ПРИМЕРЕ РЕК ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И РЕКИ ЛЕНА

А. А. Четверова<sup>1,2</sup>, Т. М. Потапова<sup>1</sup>, И. В. Федорова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет

<sup>2</sup> Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт

## Введение

В связи с интенсивным нефтегазовым и промышленным освоением водосборных территорий арктических рек во второй половине XX в. возникла проблема изменения естественного гидрохимического режима арктических водных объектов.

Водные объекты районов Крайнего Севера, особенно устьевые участки рек, являются малоизученными в гидрологическом и гидрохимическом отношении, что объясняется суровостью климатических условий арктического региона.

В связи с возросшим в последнее время интересом к изучению морских, береговых и устьевых процессов в Российской Арктике вопрос природопользования арктических регионов, особенно устьевых участков рек, становится актуальным. Поэтому для определения антропогенной нагрузки на реки северных регионов и на моря Северного Ледовитого океана необходима оценка гидрохимического режима, а также качественных и количественных характеристик геохимического стока рассматриваемых рек.

## Материалы и методы

В качестве исходных материалов использовались данные мониторинговых гидрохимических наблюдений Омского и Якутского УГМС за многолетний период (1953–1992 гг.) [8], фондовые данные Западно-Сибирской экспедиции Государственного гидрологического института за период 1989–1992 гг., а также результаты полевых исследований и лабораторных анализов проб воды и донных отложений озер о. Самойловского дельты р. Лена.

Статистическая обработка данных осуществлялась по программе Excel в соответствии с нормативами, общепринятыми на сети Гидрометслужбы [16] и в соответствии с РД 52.24.643-2002 [14].

Гидрохимические данные, обобщенные за период 1956–1974 гг., были отнесены к условно фоновому периоду – до начала широкомасштабного освоения нефтегазовых месторождений в Западной Сибири и хозяйственной деятельности.

Расчет модулей среднегодового геохимического стока производился по формуле:

$$P_i = C \cdot Q \cdot 31,5/F,$$

где  $P_i$  – модуль среднегодового стока растворенных и взвешенных веществ, т/км<sup>2</sup>;  $C$  – средняя многолетняя концентрация растворенных или взвешенных веществ, мг/л;  $Q$  – средний многолетний расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $F$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>.

Для понимания процессов, связанных с трансформацией геохимического стока, был проведен ряд экспериментальных исследований на о. Самойловском дельты р. Лена. Работы выполнялись в рамках программы «Система моря Лаптевых» и проекта DFG в летние сезоны 2008 и 2009 гг.

Для измерения глубин озер и определения контуров их поверхности использовались эхолот Garmin и GPS Garmin 60. Батиметрические схемы озер составлены с использованием программ Surfer и MapInfo.

Обработка проб воды и донных отложений в камеральных условиях выполнялась в российско-германской лаборатории полярных и морских исследований им. Отто Шмидта ААНИИ и в аналитической лаборатории Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (АВИ, Германия). Состав главных ионов в пробах воды определен методом ионохроматографии, концентрация биогенных элементов измерялась на приборе Scalar фотоколориметрическим методом. Для гранулометрического анализа колонок донных отложений применен прибор Laser Coulter, содержание органического и общего углерода ТОС/ТС определялось при помощи C/N анализатора Elementar. Геохимический анализ донных отложений озер выполнялся на ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer) и позволил определить содержание тяжелых металлов и их оксидов.

## Результаты и обсуждение

### ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕК НИЖНЕГО ПРИОБЬЯ И р. ЛЕНА (г/с КЮСЮР)

В табл. 1 приведены основные характеристики стока рассматриваемых рек в многолетнем плане, по которым можно судить о различиях между ними в гидрологическом отношении. Приведенные значения модулей стока рек сопоставимы между собой. Это дает возможность сравнения характеристик стока растворенных веществ с водосборной территории исследуемых рек.

Таблица 1

Основные характеристики стока рассматриваемых рек (закрывающий створ) [2]

Река	Период	Площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>	Годовой сток			Максимальный расход, м <sup>3</sup> /с	Минимальный расход, м <sup>3</sup> /с
			Расход, м <sup>3</sup> /с	Модуль стока, 10 <sup>3</sup> м <sup>3</sup> /км <sup>2</sup>	Слой стока, мм		
Надым	1955–2005	48	462	303	304	<u>6820</u> 1972 г.	<u>67,8</u> 1978 г.
Пур	1939–1991	95,1	900	298	299	<u>7940</u> 1948 г.	<u>97,6</u> 1969 г.
Таз	1962–1996	100	2060	334	335	<u>7230</u> 1978 г.	<u>110</u> 1975 г.
Полуй	1953–1992	21	135	202	203	<u>94</u> 1954 г.	<u>226</u> 1979 г.
Лена	1935–2005	2430	16 800	218	218	<u>220 000</u> 1989 г.	<u>366</u> 1940 г.

Режимы стока воды рек Нижнего Приобья и р. Лена носят резко выраженный сезонный характер, что видно из приведенных месячных значений расходов воды по типовым гидрографам стока рек (рис. 1 и 2). Однако для стока р. Лена типичен более длительный, растянутый период спада половодья, что связано с условиями его формирования, а также большей интенсивностью летне-осенних паводков.

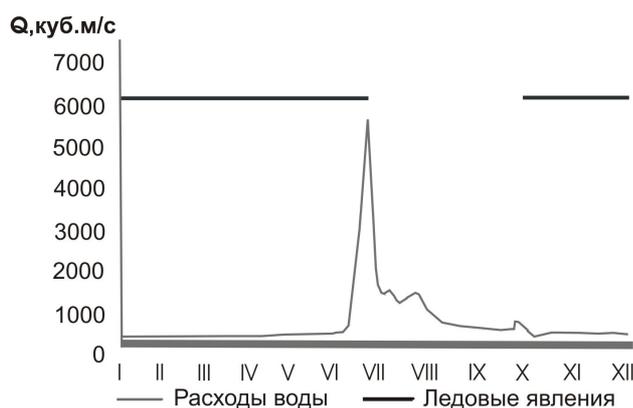


Рис. 1. Гидрограф стока р. Надым у г. Надым

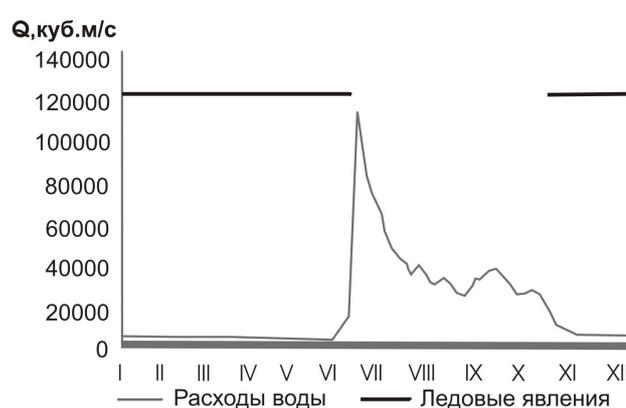


Рис. 2. Гидрограф стока р. Лена у с. Кюсюр

Основная масса воды рек проходит в летний период. За июнь и июль в створе Кюсюра проносятся свыше 57% общего стока р. Лена и до 50% стока западносибирских рек.

### УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКОГО СТОКА РЕК

Формирование геохимического стока рек происходит под влиянием ряда природных факторов. Это позволяет говорить об отдельных особенностях рассматриваемых рек и качественных характеристиках стока.

Для данных рек Нижнего Приобья и верхнего течения р. Лена прослеживаются как общие закономерности формирования гидрохимического состава вод, находящиеся под болотным влиянием, – повышенные концентрации железа (до 1,5 мг/л), кремния (до 6 мг/л), относительно высокая

цветность, достигающая 150 гр. по Pt-Co шкале, перманганатная окисляемость (до 55,2 мг/л), а также слабокислые и нейтральные значения pH (6,2–7,6), так и ряд различий.

Для западносибирских рек характерны воды ультрамалой минерализации (<200 мг/л) в течение всего года. Воды относятся к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе по классификации О. А. Алекина [11]. В отличие от западносибирских рек к характерным особенностям вод р. Лена относятся более высокие показатели общей минерализации, изменяющейся в широких пределах – от 11 до 550 мг/л – от вод ультрапресных (<200 мг/л) до вод повышенной минерализации (>500 мг/л), гидрокарбонатно-кальциевые по соотношению главных ионов, в отдельные сезоны переходящие к хлоридно-натриевым.

Для выявления генезиса формирования ионного состава вод был проведен корреляционный анализ зависимости изменения общей минерализации (М) от изменения концентраций отдельных ионов (табл. 2 и 3), из которого можно сделать вывод о наибольшей зависимости величины общей минерализации западносибирских рек от концентрации сульфатов и хлоридов в период открытой воды. Увеличение значений общей минерализации происходит за счет возрастания содержания хлоридов и сульфатов в водах рек, что связано с антропогенной нагрузкой на водные объекты Нижнего Приобья. В подледный период наибольшая зависимость общей минерализации наблюдалась от ионов кальция и гидрокарбонатных ионов, что соотносится с характерным для данных вод гидрокарбонатно-кальциевым типом вод.

Таблица 2

**Фрагмент корреляционной матрицы для рек Надым и Пур за период 1975–1992 гг.**  
(число членов – 30 – для подледного периода и 72 – для периода открытой воды)

Период открытой воды							Подледный период						
	М	Ca	Mg	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl		М	Ca	Mg	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl
М	1	0,14	0,19	0,19	0,95	0,51	М	1	0,88	0,48	0,90	0,77	0,72

Таблица 3

**Фрагмент корреляционной матрицы для р. Лена**  
(53 члена для подледного периода и 63 члена для периода открытой воды)

Период открытой воды								Подледный период							
	М	Ca	Mg	Na + K	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl		М	Ca	Mg	Na + K	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl
М	1	0,78	0,58	0,63	0,52	0,73	0,83	М	1	0,89	0,66	0,73	0,92	0,95	0,96

Несмотря на то что по среднемноголетним характеристикам воды р. Лена относятся к гидрокарбонатно-кальциевому типу, из приведенной матрицы видно, что в оба периода наблюдалась наиболее высокая корреляционная связь общей минерализации с анионами хлора. Это, вероятно, связано с более резко выраженным (по сравнению с сибирскими реками) влиянием подземного стока на ионный состав воды р. Лена в зимний период.

В сезонном ходе общей минерализации для рассматриваемых рек наблюдалась обратная зависимость ее хода от годового хода водности. Однако максимальные показатели общей минерализации р. Лена зафиксированы в половодье, в отличие от западносибирских рек, для которых максимум общей минерализации связан со снижением водности в период летней межени.

В период весеннего половодья происходит поступление поверхностных вод с заболоченных водосборов рек Нижнего Приобья. Это сопровождается увеличением, а также наибольшими годовыми значениями цветности и концентраций железа, снижением и наименьшими значениями pH и общей минерализации. Для летнего – осеннего периода характерны минимальные концентрации биогенных элементов (азота нитратного, азота аммонийного и фосфора общего), что обусловлено пиком вегетации и интенсивным потреблением питательных веществ. Наибольшие средние концентрации нефтепродуктов характерны для зимней межени, что объясняется минимальным разбавлением (минимальными расходами воды) в данный период, для него же типичны наибольшие концентрации восстановленных форм азота (аммонийного азота) в связи с увеличением доли грунтового питания, процессом аммонификации и дефицитом кислорода в рассматриваемый период.

При сохранении основных закономерностей сезонной изменчивости гидрохимических характеристик рек Западной Сибири к отличительным особенностям сезонного хода растворенных элементов в воде р. Лена относятся время наступления максимума минерализации (как

было отмечено выше), а также наибольшие концентрации загрязняющих веществ (фенолов и нефтепродуктов) в период половодья, когда происходит их смыв с водосборной территории реки тальми водами.

## ГЕОХИМИЧЕСКИЙ СТОК РЕК

Речной сток является одним из основных источников поступления растворенных и взвешенных веществ в моря Северного Ледовитого океана. Для представления о величине и характере нагрузки на моря Российской Арктики необходимо знать количественные характеристики геохимического речного стока. Под геохимическим стоком в данной работе следует понимать сток растворенных и взвешенных веществ.

На основе многолетнего ряда гидрологических и гидрохимических данных были рассчитаны модули стока растворенных и взвешенных веществ. В результате сравнительного анализа величин, полученных для рассматриваемых рек, был сделан ряд выводов.

Для р. Лена зафиксированы значительно более высокие величины модулей (показателей) ионного стока по сравнению с западносибирскими реками, что связано с большей водностью р. Лена, а также более высокими значениями величин общей минерализации. Их средние значения находились на уровне 33 т/км<sup>2</sup>. Для рек Надым и Пур средние значения модулей ионного стока не превышали 14 т/км<sup>2</sup>. Сток биогенных элементов (аммонийного и нитритного азотов и минерального фосфора), наоборот, характеризуется более высокими показателями для рек Западной Сибири – Надым и Пур (в 5–7 раз больше), что объясняется высокими значениями концентраций этих элементов в водах высокозаболоченных рек. Для нитратного азота имеет место обратная закономерность: сток нитратного азота р. Лена в 3–5 раз выше стока западносибирских рек.

Средние показатели годового стока нефтепродуктов для рек Надым и Пур составляют 109 и 65 кг/км<sup>2</sup> соответственно, что на порядок выше таковых для р. Лена (12 кг/км<sup>2</sup>). Похожая закономерность сохраняется и для стока фенолов, что подтверждает ранее сделанные выводы о хроническом загрязнении нефтепродуктами рек Нижнего Приобья. Показатели стока тяжелых металлов (медь, цинк) составляют сотни грамм с км<sup>2</sup> для р. Лена и до 1 кг/км<sup>2</sup> для Надыма (по меди), что также связано с большей степенью хозяйственного освоения водосбора и большим болотным влиянием рек Западной Сибири.

В результате проведенной оценки величин стока растворенных веществ для рек Нижнего Приобья и верхнего течения р. Лена можно сделать вывод о том, что на формирование ионного стока прямое влияние оказывает фактор водности (т. е. чем больше водность реки, тем больше растворенных веществ она транспортирует), для стока растворенных органических веществ подобная закономерность прослеживалась только в отдельные по водности годы, т. е. при формировании стока растворенных биогенных элементов происходит наложение фактора водности и концентрационного фактора.

Для внутригодового распределения стока растворенных веществ характерно то, что основная их часть для р. Лена приходится на половодье, что подтверждает факт преобладающего влияния водности на формирование ионного стока, стока органических, взвешенных и загрязняющих веществ. Для р. Надым сохраняется закономерность преобладания ионного стока, стока взвешенных и загрязняющих веществ в половодье по сравнению с остальными сезонами. Для биогенных веществ (нитритов и фосфатов) более высокие показатели стока зафиксированы в маловодные периоды года – летне-осеннюю межень и подледный период соответственно.

За рассмотренный многолетний период показатель ионного стока р. Лена уменьшился почти в 3 раза. Тенденция снижения показателей стока наблюдается и для всех главных ионов, за исключением магния. Сток ионов кальция уменьшился на 54%, натрия+калия – на 43%, гидрокарбонатов – на 44%, сульфатов – на 7%, хлоридов – на 30%. Для биогенных элементов наблюдалось снижение показателей стока для нитратов в 2,2 раза, для фосфатов на 7%, более чем в 2 раза для стока кремния, а также увеличение стока железа в 9 раз.

При сравнении модулей стока рек Надым и Пур за два рассматриваемых периода отмечено увеличение ионного стока в антропогенно-измененный период по сравнению с периодом условного фона, что справедливо и для стока всех главных ионов, за исключением хлора для стока р. Пур. Для азота нитратного и фосфора в маловодные годы наблюдается увеличение стока, что говорит о преобладающей роли концентрационного фактора.

## ЭКСПЕДИЦИОННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ДЕЛЬТЕ р. ЛЕНА

Для понимания процессов, происходящих в дельте, связанных с трансформацией геохимического стока, был проведен ряд экспериментальных исследований на одном из островов дельты р. Лена – о. Самойловском Оленекской протоки.

По результатам гидрохимического анализа озерных вод и вод Оленекской протоки реки можно сделать вывод о том, что химические характеристики воды озер сохраняют основные особенности протоки. Воды озер бесцветны или их цветность не превышает  $10^\circ$  (озера № 2 и 8), у них ультрамалая минерализация ( $<100$  мг/л) – это гидрокарбонатно-кальциевые, реже гидрокарбонатно-магниево-кальциевые воды с нейтральными или слабощелочными значениями рН (6,7–7,7). Газовый режим водоемов характеризуется достаточно высоким содержанием растворенного в воде кислорода по всей водной толще ( $>100\%$  нас.), которое резко возрастает в ветреную погоду. Для биогенных элементов типичны достаточно высокие для северных регионов концентрации фосфатов (30–680 мкг/л). В течение месяца наблюдается снижение концентраций фосфатов почти во всех рассматриваемых водоемах, что объясняется наступлением пика вегетации водной растительности. Концентрации окисленных форм азота очень малы и имеют значения на уровне тысячных долей миллиграмма.

Данные по содержанию биогенных элементов говорят об отсутствии антропогенного загрязнения, несмотря на использование некоторых из озер о. Самойловского для питьевых и хозяйственных нужд исследовательской станции.

Для оценки самоочищающей способности озерных экосистем были проанализированы колонки верхнего слоя донных отложений старично-термокарстовых и полигональных озер острова. Концентрации металлов и их оксидов, полученные в результате лабораторных анализов проб донных отложений озер, соотносятся с их природным содержанием в почвах и горных породах региона.

Результаты исследований подтверждают вывод о высокой самоочищающей способности р. Лена в дельте, что согласуется и с выводами, сделанными М. Б. Заславской [2], относительно высокой самоочищающей способности р. Лена по сравнению с другими крупными арктическими реками, такими как Обь и Енисей.

Однако в связи с единичностью данных наблюдений можно сделать только первоначальные выводы о процессах, формирующих геохимические особенности дельты р. Лена. Генезис этих процессов сложен и требует дальнейшего уточнения.

### Заключение

1. На основе обобщения фондовых и картографических материалов установлены основные закономерности формирования химического состава вод рек Нижнего Приобья и р. Лена в ее нижнем течении, которые определяются следующими физико-географическими особенностями: длительным периодом ледостава, что приводит к созданию дефицита кислорода в конце зимней межени, распространением многолетней мерзлоты и криогенных форм рельефа и высокой заболоченностью водосборных территорий рек.

2. Величины общей минерализации западносибирских рек имеют наибольшую зависимость от концентрации сульфатов и хлоридов в период открытой воды, что связано с антропогенной нагрузкой на водные объекты Нижнего Приобья. Для воды р. Лена в оба периода наблюдалась наиболее высокая корреляционная связь общей минерализации с анионами хлора, что объясняется влиянием подземного стока на ионный состав воды р. Лена в зимний период.

3. На формирование ионного стока рассматриваемых рек прямое влияние оказывает фактор водности. При формировании стока растворенных органических веществ происходит наложение фактора водности и концентрационного фактора.

4. За многолетний период произошло уменьшение показателей ионного стока р. Лена почти в 3 раза, стока железа – в 9 раз, а также снижение стока биогенных элементов. При сравнении модулей стока рек Надым и Пур отмечено увеличение ионного стока, стока биогенных элементов в антропогенно-измененный период по сравнению с периодом условного фона.

5. На основе химико-аналитических исследований воды и донных отложений озер о. Самойловского дельты р. Лена установлены значения главных химических характеристик и геохимические показатели (водородный показатель рН, емкость катионного обмена ЕКО, содержание органических веществ и концентрации тяжелых металлов и их оксидов) донных отложений водоемов.

Изучение геохимического состава донных отложений островных озер, подверженных речному влиянию р. Лена, открывает возможность оценки самоочищающей способности озерных экосистем и их устойчивости к антропогенному воздействию.

### Литература

1. Временные методические указания по проведению расчетов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков. Л., 1983.
2. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / Под ред. проф. Алексеевского. 2007.
3. Гидрологические ежегодники. Бассейн Карского моря. Т. 6, вып. 4–9. 1956–1973 гг.; Бассейн моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского. Т. 8, вып. 0–7. 1960–1974 гг.
4. Гордеев В. В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М., 1983.
5. Гордеев В. В. и др. Оценка выноса биогенных элементов с речным стоком в окраинные моря Российской Арктики // Водные ресурсы. 1999. Т. 26, № 2.
6. Государственный водный кадастр. Т. 1, вып. 10–11. 1989–1992 гг.
7. Дубровина Н. Л. Гидрохимический режим устьевых областей рек Пур и Таз // Труды ААНИИ. 1974. Т. 308. С. 173.
8. Ежегодные данные о качестве поверхностных вод по территории деятельности Омского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за 1989–1992 гг. (Т. 6, вып. 4–9.)
9. Зубакина А. Н. Особенности гидрохимического режима устьевой области Лены // Труды ГОИН. 1979. Вып. 143. С. 69–76.
10. Михайлов В. Н. Гидрология устьев рек. М., 1998.
11. Никаноров А. М. Гидрохимия. СПб., 2001. 347 с.
12. Никаноров А. М., Брызгало А.В., Черногаева Г. М. Антропогенно-измененный фон и его формирование в пресноводных экосистемах России // Метеорология и гидрология. 2007. № 11.
13. Перечень предельно допустимых концентраций и ориентировочно безопасных уровней воздействия вредных веществ для воды рыбохозяйственных водоемов. М., 1995. 120 с.
14. РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям.
15. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 3. Нижний Иртыш и Нижняя Обь. Л., 1973. 320 с.; Т. 17. Лено-Индигирский район. Л., 1972.
16. Шелутко В. А. Методы обработки и анализа гидрологической информации. СПб., 2007.
17. Шпакова Р. Н. Формирование качества воды в реке Лена в современный период: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1999.