УДК 556.51/54:556.16(571.56)

ГИДРОЛОГИЯ И ИОННЫЙ СТОК РЕКИ СЕВЕРО-ВОСТОКА ЯКУТИИ**¹Макаров В.Н., ²Ноговицын Д.Д., ²Шейна З.М.**¹*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru;*²*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН), Якутск, e-mail: dmitry-nogovitzyn@yandex.ru, zin.scheina2016@yandex.ru*

Рассматриваются особенности гидрологии и стока растворенных веществ р. Алазеи, расположенной за полярным кругом, в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород. В качестве исходных материалов использовались результаты полевых исследований и лабораторных анализов проб воды комплексной научно-исследовательской экспедиции. Река Алазея в гидрологическом и гидрохимическом отношении является малоизученной рекой арктической зоны. Для бассейна реки характерно минимальное антропогенное давление. Территория бассейна р. Алазеи является одним из труднодоступных арктических регионов Северо-Восточной Якутии с естественными природными комплексами. Основными источниками питания поверхностных вод служат атмосферные осадки, грунтовые воды и подземные льды деятельного слоя и многолетнемерзлых пород. Ежегодно с территории бассейна Алазеи процессами флювиальной денудации удаляется в Восточно-Сибирское море 0,5 млн т растворенных веществ. Модуль ионного стока очень низкий – 6,8 т/км², характерен для равнинных рек арктических регионов. Минимальные значения стока обусловлены арктическими климатическими и ландшафтными параметрами, влияющими на интенсивность химического выветривания горных пород. Ионный сток р. Алазеи практически не зависит от антропогенного влияния и определяется геохимическими свойствами элементов, литологическими особенностями пород и составом почв бассейна реки, климатическими условиями, растительностью. Химический состав речных вод бассейна Алазеи определяется почвенно-биоклиматическими особенностями и составом горных пород. Ионный состав воды р. Алазеи относится к гидрокарбонатному классу группы кальция и остается практически постоянным в различные гидрологические периоды. Химический сток реки на её протяжении далеко не одинаков. От верхнего течения к устью он увеличивается, и максимальная минерализация воды и наиболее интенсивный вынос химических элементов наблюдается в устье Алазеи.

Ключевые слова: Арктика, гидрология, ионный сток, река, модуль стока, анионы, катионы, микроэлементы

HYDROLOGY AND ION SINK OF THE NORTHEAST OF YAKUTIA RIVER**¹Makarov V.N., ²Nogovitsyn D.D., ²Sheina Z.M.**¹*Melnikov Institute of Permafrost Studies, Siberian Branch of the Russian Academy of Science (IMZ SB RAS), Yakutsk, e-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru;*²*The V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Science (IPTPN SB RAS), Yakutsk, e-mail: dmitry-nogovitzyn@yandex.ru, zin.scheina2016@yandex.ru*

The features of hydrology and flow of dissolved substances of the Alazeya River located above the Arctic Circle in the area of continuous distribution of permafrost are considered. As starting materials the results of field studies and laboratory analyses of water samples made by the complex research expedition were used. The Alazeya River in hydrological and hydro chemical relation is a little-studied river of the Arctic zone. The river basin is characterized by minimal human pressure. The territory of the Alazeya basin is one of the hard-to-reach Arctic regions of the North-East Yakutia with natural complexes. Precipitation, groundwater and underground ice of active layer and permafrost are the primary power supply of surface waters. Annually 0.5 million tons of dissolved substances are removed by the processes of fluvial denudation from the Alazeya basin to the East Siberian Sea. Module of the ion sink is very low – 6.8 tons/km². It is typical for the sluggish rivers of the Arctic regions. Minimum value is a result of the Arctic climatic and landscape parameters affecting the intensity of chemical weathering of rocks. The ion sink of the Alazeya River is almost independent from human influence and determined by the geochemical properties of elements, lithological features of rocks and soil composition of the river basin, climatic conditions, and vegetation. The chemical composition of river waters of the Alazeya basin is determined by soil-bioclimatic characteristics and composition of the rocks. The ionic composition of the Alazeya water refers to hydrocarbonate class of the calcium group and remains almost constant in different hydrological periods. The chemical flow of the river over its length is not the same. From the upstream to the mouth it increases and the maximum water mineralization and the most intensive removal of chemical elements are observed at the mouth of the Alazeya.

Keywords: the Arctic, hydrology, ion sink, river, flow rate, anions, cations, micro elements

Реки Арктики относятся к одним из самых нетронутых экосистем по всему миру. Несмотря на это, они находятся под угрозой глобального и регионального антропогенного воздействия [1]. Познание причин и последствий климатических изменений в Арктике все еще ограничено отсутствием

данных относительно гидрологических характеристик водных бассейнов [1]. В этих условиях освоение природных ресурсов Арктики должно происходить как с учетом экономических интересов страны, так и особым подходом к уникальной природной среде [2]. Кроме того, глобальное по-

тепление увеличивает проблемы, связанные с гидрологией арктических рек [2]. Становится очевидной необходимость в экологических исследованиях современного состояния уязвимых рек арктической части России [3].

Вопросы изучения особенностей формирования ионного стока рек в условиях глобального изменения климата и антропогенной нагрузки рассмотрены во многих работах российских ученых [4–6]. Работы [7, 8] посвящены количественным различиям ионного стока и оценке его антропогенной составляющей. Ю.Б. Кирста, А.В. Пузанов [9] отмечают, что формирование ионного стока происходит в основном катионами кальция Ca^{2+} , магния Mg^{2+} , натрия Na^{+} , калия K^{+} , анионами гидрокарбонатов HCO_3^{-} , сульфатов SO_4^{2-} , хлоридов Cl^{-} .

В статье ионный сток реки Северо-Востока Якутии рассматривается на примере Алазеи. Территория бассейна реки является одним из труднодоступных арктических регионов с естественными природными комплексами. Основными источниками питания поверхностных вод служат атмосферные осадки, грунтовые воды и подземные льды деятельного слоя и многолетнемерзлых пород. Река в гидрологическом и гидрохимическом отношении является малоизученной рекой Арктики, для бассейна которой характерно минимальное антропогенное давление.

Цель исследования: определение зависимости ионного стока реки Алазея от природных факторов.

Материалы и методы исследования

В бассейне р. Алазея авторами был выполнен комплекс гидрометрических и гидрогеохимических наблюдений. В качестве исходных материалов использовались результаты полевых исследований и лабораторных анализов проб воды комплексной научно-исследовательской экспедиции. Методика проведения полевых работ, определение, расчеты, анализ гидрологических характеристик поверхностных вод выполнены в соответствии с Наставлениями гидрометеорологическим станциям и постам [10, 11]. Анализы проб воды выполнены в специализированной аккредитованной лаборатории: Центральной геолого-аналитической лаборатории ГУП РС(Я) – «Центргеоаналитика».

Гидрологический режим р. Алазеи. Бассейн реки расположен на северо-востоке Якутии, протекает по западной стороне

Колымской низменности [12]. Реку Алазея длиной 1 590 км образуют реки Нелькан и Кадылчан [13]. Река имеет два крупных притока: с левой стороны – Рассоха длиной 790 км и Буор-Юрях (244 км) – с правой. В верхней части течет по горной местности, в нижней – по равнинной. Площадь водосборного бассейна составляет 74 700 км², и по её размерам занимает 7-е место среди рек Якутии и 27-е – в России [14]. Поверхностные воды района сосредоточены в основном в р. Алазее (3 734 водотока) и многочисленных озерах (24 391 озеро) [14]. В среднем и нижнем течении река часто меандрирует и через протоки-«виски» сообщается с многочисленными озерами. Распределение стока в течение года также показывает относительно большую его зависимость от наличия озер. Объем стока в зимний сезон составляет 4%, в лимитирующий – 20% [15]. В конце мая наступает начало весеннего половодья, при этом максимальный расход воды наблюдается в последней декаде июня. Таким образом, за весенний период происходит формирование более 60% годового стока реки. В маловодные годы конец половодья отмечается в последних числах июля, а летняя межень – в августе-сентябре. В многоводные годы сроки конца половодья трудно выявить. В этих условиях наибольший расход воды наблюдается даже во второй декаде августа. Формирование стока в верхнем и среднем течении реки схоже. В верховье подъем уровня воды над минимальным зимним равняется 5,0 м, в средней части реки – 4,5 м, а в низовье – 2,0 м, что связано с повышенными осадками. Режимы стока и уровней воды устьевое участка реки подвержены воздействию со стороны моря.

Ввиду редкой сети гидрометеорологических наблюдений в бассейне р. Алазеи для исследования связей величины стока и факторов, его обуславливающих, применялся метод регрессионного (корреляционного) анализа. Коэффициент корреляции связи величины стока и зимних осадков составляет 0,22, летних – 0,51, что показывает значительно большее влияние на сток летних осадков. При этом вариация осадков за теплый период года значительно выше вариации осадков за холодный период.

Гидрохимический режим реки. Территория бассейна р. Алазеи является одним из труднодоступных арктических регионов Северо-Восточной Якутии с естественными природными комплексами, Химический

состав речных вод бассейна Алазеи определяется почвенно-биоклиматическими особенностями и составом горных пород. Основными источниками питания природных вод служат атмосферные осадки (237 мм/год) и подземные льды деятельного слоя и многолетнемерзлых пород. Антропогенная составляющая стока минимальна при практическом отсутствии урбанизации и низкой плотности населения. В бассейне реки проживает около 2,5 тыс. чел., занятых в основном в сельском хозяйстве (табл. 1).

Таблица 1
Численность населения и экономика
в бассейне р. Алазеи

Село	Население, чел.	Экономика
Андрюшкино	732	Сельское хозяйство (скотоводство, коневодство, оленеводство, звероводство, рыболовство, пушной промысел)
Аргахта	502	
Сватай	534	
Эбях	486	

Минерализация атмосферных осадков очень мала – 6–11 мг/л и составляет 20–30% солевого состава поверхностных вод. Хлоридно-гидрокарбонатные преимущественно натриевые по составу катионов атмосферные осадки приносят основную массу морских солей – хлоридов натрия в поверхностный сток.

Ископаемые льды и грунтовые надмерзлотные воды близки по химическому составу к слабоминерализованным гидрокарбонатным, преимущественно магниевые, слабокислые, с низкими значениями окислительно-восстановительного потенциала и высоким содержанием аммония и железа. Существенное влияние на химический состав надмерзлотных вод: повышение роли марганца и аммония, заметный сдвиг значений Eh в сторону восстановительных значений оказывают процессы криогенеза.

Выщелачивание горных пород и значительные массы воды, которые содержатся в озерах и деятельном слое, определяют химический состав речных вод бассейна р. Алазея. Роль подземного стока в формировании солевого состава речных вод незначительна.

На всем протяжении вода р. Алазеи остается маломинерализованной (23–38 мг/л), гидрокарбонатной, смешанной по составу катионов с некоторым преобладанием каль-

ция, слабокислой, очень мягкой (0,4–0,7 мг-экв), с высокими значениями величины Eh (в среднем 519 мВ) и повышенным содержанием Fe и тяжелых металлов (Cu и Mn).

Результаты исследования и их обсуждение

Ионный сток является одной из составляющих геостока [16] и качественной характеристикой гидрологических, геохимических и геоэкологических процессов в речных бассейнах.

Ионный сток р. Алазеи практически не зависит от антропогенного влияния (при плотности населения около 0,033 чел/км²) и определяется природными факторами: геохимическими свойствами элементов, литологическими особенностями пород и составом почв бассейна реки, климатическими условиями, растительностью.

Величина ионного стока макро- и микрокомпонентов и характер изменения этих показателей от верхнего течения р. Алазеи до устья приведены в табл. 2.

Ежегодно с территории бассейна Алазеи процессами флювиальной денудации удаляется в Восточно-Сибирское море 0,5 млн т растворенного веществ. Модуль ионного стока очень низкий – 6,8 т/км² [17], характерен для равнинных рек арктических регионов. Минимальные значения стока обусловлены арктическими климатическими и ландшафтными параметрами, влияющими на интенсивность химического выветривания горных пород.

С территории бассейна Алазеи (табл. 2) в растворенном виде ежегодно удаляется около 0,5 млн. т веществ. В составе растворимых продуктов денудационного происхождения основным анионом на всем протяжении реки является гидрокарбонат-ион (66%). Среди катионов главная роль принадлежит кальцию (14%) и магнию (7%). Вклад остальных макрокомпонентов в растворимый сток составляет в сумме около 13%. Довольно значительна роль в стоке мезокомпонентов природных вод: железа – около 1% и соединений азота – 0,5%. Модуль ионного стока тяжелых металлов (Cu, Mn, Pb, Ni) в пределах $n \cdot 10^{-3}$ т/год км².

По уменьшению величины ионного стока химические компоненты группируются в следующий ряд:

Небольшая величина модуля ионного стока р. Алазеи – 6,81 т/км²·год, характерна

для равнинных рек субарктической зоны, зоны очень слабой химической денудации. Минимальные значения стока растворенных веществ обусловлены положением бассейна реки в холодной и влажной тундре, широким распространением в пределах Колымской низменности малорастворимых терригенных отложений, климатическими и ландшафтными параметрами арктического района, сплошным распространением многолетнемерзлых пород, ограничивающим подземный сток.

Химический сток реки на её протяжении далеко не одинаков. От верхнего течения

к устью он увеличивается, и максимальная минерализация воды и наиболее интенсивный вынос химических элементов наблюдается в устье Алазеи (рисунок).

Наблюдается пространственное изменение величины ионного стока, отражающее особенности геологического строения бассейна Алазеи. Основным источником растворенных веществ в верхнем течении реки – девон-карбоновые карбонатные породы и верхнемеловые липарты и дациты Алазейского плоскогорья, что определяет заметную роль в стоке сульфатов, магния и железа (табл. 2).

Таблица 2

Ионный сток р. Алазея (Порок – Андрюшкино – устье)

Компоненты	Ионный сток, т/сут						Модуль стока, т/год км ² (%)
	Расстояние от устья, км					Устье реки	
	1272	1060	825	521	46		
Ионный сток (½ HCO ₃ ⁻)	108,9	116,6	414,1	788,1	796,4	1376,8	6,81
HCO ₃ ⁻	53,6	60,2	202,6	363,0	355,8	612,4	5,29 (66)
Cl ⁻	3,2	3,5	16,8	22,6	25,3	44,3	0,19 (2)
SO ₄ ²⁻	7,5	8,4	23,2	18,3	17,1	95,7	0,29 (4)
Ca	22,7	15,0	62,3	128,1	132,8	234,9	1,14 (14)
Mg	12,1	16,9	43,2	68,8	70,4	115,2	0,58 (7)
Na	2,2	1,7	12,6	27,1	25,3	50,8	0,25 (3)
K	0,9	1,7	12,6	16,2	25,3	45,2	0,22 (3)
Fe	0,91	1,80	4,21	9,05	21,08	36,95	0,05 (1)
NH ₄ ⁺	0,33	0,42	1,03	1,64	6,53	8,27	0,012
NO ₃ ⁻	0,37	0,48	1,17	1,86	7,37	9,33	0,013
N	0,7	0,9	2,2	3,5	13,9	17,6	0,025
Cu	0,030	—	—	0,161	0,152	0,266	1,089·10 ⁻³
Mn	0,014	—	—	0,113	0,118	0,207	0,504·10 ⁻³
Pb	0,007	—	—	0,074	0,038	0,066	0,260·10 ⁻³
Ni	0,007	—	—	0,063	0,044	0,037	0,244·10 ⁻³

Изменение минерализации воды р. Алазеи от верхнего течения (Порок) до устья

В среднем и нижнем течении Алазея дренирует верхнечетвертичные и современные терригенные отложения, представленные песками, галечниками, супесями, суглинками, торфом, подземными льдами. Здесь река протекает по заболоченной тундре, равнине, насыщенной органикой. Обилие органического вещества (торф, растительные остатки) и застойный режим обеспечивают слабо восстановительную среду. На этом участке реки возникает своеобразный «тундровый» геохимический барьер: органический и, возможно, механический (связанный с незначительным уменьшением скорости течения реки). Воздействие тундрового барьера влияет на понижение ионного стока ряда макро- и микрокомпонентов, и наиболее интенсивное для тяжелых металлов – свинца и никеля, и минимальное для гидрокарбонатов (в скобках величина снижения ионного стока на геохимическом барьере, %):

Выводы

Ионный сток Алазеи практически не зависит от антропогенного влияния (при плотности населения около 0,033 чел/км²) и определяется природными факторами: геохимическими свойствами элементов, литологическими особенностями пород и составом почв бассейна реки, климатическими условиями, растительностью.

Минимальные значения стока растворенных веществ обусловлены положением бассейна реки в холодной и влажной тундре, широким распространением в пределах Колымской низменности малорастворимых терригенных отложений, климатическими и ландшафтными параметрами арктического района, сплошным распространением многолетнемерзлых пород, ограничивающим подземный сток. От верхнего течения к устью химический сток реки Алазея увеличивается и максимальная минерализация воды и наиболее интенсивный вынос химических элементов наблюдается в устье.

Список литературы / References

1. Brittain J.E., Bogen J., Khokhlova L.G., Melvold K., Stenina A.S., Gislason G.M., Brors S., Kochanov S.K., Olafsson J.S., Ponomarev V.I., Jensen A.J., Kokovkin A.V., Pettersson L.-E. Arctic Rivers. Rivers of Europe. 2009. Chapter 9. P. 337–379.
2. Gudmestad O.T. Hydrology of Arctic Rivers. Ecology and Environment. River Basin Management YII 225. 2015. P. 225–234. DOI: 10.2495/RM150201.
3. Брызгалов В.А., Третьяков М.В., Румянцев Е.В., Шестакова Е.Н., Муждаба О.В. Реки опорных зон Российской Арктики и их современное состояние // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 4. С. 365–379. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-365-379.
4. Брызгалов В.А., Третьяков М.В., Румянцев Е.В., Шестакова Е.Н., Муждаба О.В. Rivers of the stronghold area of the Russian Arctic and their current state // Arctic and Antarctic Research. 2018. Vol. 64. № 4. P. 365–379 (in Russian).
5. Ушаков М.В. Ионный сток рек Северного Приохотоморья // Вода: химия и экология. 2012. № 10. С. 17–20.
6. Ushakov M.V. Ion sink of the rivers associated with north part of the Okhotsk sea // Water: Chemistry and Ecology. 2012. № 10. P. 17–20 (in Russian).
7. Таиров А.З. Об изучении ионного стока реки Сырдарьи в ее нижнем течении // Вопросы географии и геоэкологии. 2015. № 1. С. 67–71.
8. Tairov A.Z. About Study of Ionic Flow of Syrdarya River in its Lower Part // Voprosy geografii i geoekologii. 2015. № 1. P. 67–71 (in Russian).
9. Савичев О.Г. Ионный сток Средней Оби и ее крупных притоков // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 6. С. 40–44.
10. Savichev O.G. Ionic flow of the Middle Ob and its major tributaries // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2004. T. 307. № 6. P. 40–44 (in Russian).
11. Кольмакова Е.Г. Особенности процессов трансформации ионного стока рек бассейна Немана в условиях антропогенной нагрузки. [Электронный ресурс]. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/178811> (дата обращения: 30.07.2019).
12. Kolmakova E.G. Features of the processes of transformation of the ion flow of the rivers of the Neman River basin under conditions of anthropogenic load. [Electronic resource]. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/178811> (date of access: 30.07.2019) (in Russian).
13. Парфенова Г.К. Антропогенные изменения гидрохимических показателей качества вод. Томск: Аграф-пресс, 2010. 203 с.
14. Parfenova G.K. Anthropogenic changes in hydrochemical indicators of water quality. Tomsk: Agraf Press, 2010. 203 p. (in Russian).
15. Кирста Ю.Б., Пузанов А.В. Системно-аналитическое моделирование ионного стока горных рек // Ползуновский альманах. 2018. № 4. С. 113–116.
16. Kirsta Yu.B., Puzanov A.V. System-analytical modeling of the ion flow of mountain rivers // Polzunovsky Almanac. 2018. № 4. P. 113–116 (in Russian).
17. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Ч. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 384 с.
18. Manual to hydrometeorological stations and posts. Issue. 6. Part 1. L.: Gidrometeoizdat, 1978. 384 p. (in Russian).
19. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Ч. 2. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 251 с.
20. Manual hydrometeorological stations and posts. Issue 6. Part 2. L.: Gidrometeoizdat, 1972. 251 p. (in Russian).
21. Готовцев С.П., Копырина А.П., Ефимова А.П., Захарова В.И., Ноговицын Д.Д., Порядина Л.Н., Заболотник П.С., Сыромятников И.И., Иванова А.З., Егоров Н.Н., Десяткин Р.В., Охлопков И.М., Иванова Е.И., Михалева Л.Г., Кириллин Е.В., Габышева О.И., Салова Т.А., Кильманинов В.В. Криоэкосистемы бассейна реки Алазеи. Новосибирск: Гео, 2018. 211 с.
22. Gotovtsev S.P., Kopyrina A.P., Efimova A.P., Zakharova V.I., Nogovitsyn D.D., Poryadina L.N., Zabolotnik P.S., Syromyatnikov I.I., Ivanova A.Z., Egorov N.N., Desyatkin R.V., Okhlopkov I.M., Ivanova E.I., Mikhaleva L.G., Kirillin E.V., Gabysheva O.I., Salova T.A., Kilmyaninov V.V. Cryo-ecosystems of the Alazei river basin. Novosibirsk: Geo, 2018. 211 p. (in Russian).
23. Ресурсы поверхностных вод. Гидрологическая изученность. Т. 17. Лено-Индигирский район. Вып. 7. Л.: Гидрометиздат, 1966. 328 с.
24. Surface water resources. Hydrological knowledge. V. 17. Leno-Indigirsky District. Issue 7. L.: Gidrometizdat, 1966. 328 p. (in Russian).
25. Аржакова С.К., Жирков И.И., Кусатов К.И., Андросов И.М. Реки и озера Якутии: краткий справочник. Якутск: Бичик, 2007. 133 с.

Arzhakova S.K., Zhirkov I.I., Kusatov K.I., Androsov I.M. Rivers and lakes of Yakutia: short right. Yakutsk: Bichik. 2007. 133 p. (in Russian).

15. Макаров В.Н., Ноговицын Д.Д., Кильмянинов В.В. Гидрология и гидрохимия реки Алазея // Наука и образование. 2010. № 1. С. 84–90.

Makarov V.N., Nogovitsyn D.D., Kilmyaninov V.V. Hydrology and hydrochemistry of the Alazey River // Science and Education 2010. № 1. P. 84–90 (in Russian).

16. Паромов В.В., Савичев О.Г., Шантыкова Л.Н., Тор-гашева Т.А. Ионный сток и химический состав вод ледни-вой реки Актру // Вестник Томского государственного уни-верситета. 2014. № 383. С. 227–231.

Paromov V.V., Savichev O.G., Shantyikova L.N., Torgashe-va T.A. Ionic flow and chemical composition of the waters of the glacier river Aktru // Bulletin of Tomsk State University. 2014. № 383. P. 227–231 (in Russian).

17. Макаров В.Н. Ионный сток арктической реки Ала-зея // Третьи виноградовские чтения. Грани гидрологии. Сборник докладов Международной научной конференции памяти выдающегося гидролога Юрия Борисовича Вино-градова. Под редакцией О.М. Макарьевой. 2018. С. 86–91.

Makarov V.N. Ionic flow of the Arctic River Alazey // Tret'i vinogradovskiye chteniya. Grani gidrologii. Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii pamyati vyd-ayushchegosya gidrologa Yuriya Borisovicha Vinogradova. Pod redaktsiyey O.M. Makar'yevoy. 2018. P. 86–91 (in Russian).