

**Литература**

1. Павлова Н.А., Колесников А.Б., Ефремов В.С. Состав межмерзлотных вод в Центральной Якутии // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами. Томск: Изд-во НТЛ, 2012. С. 162–165.
2. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 144 с.
3. Иванов М.С. Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск: Наука, 1984. 123 с.
4. Анисимова Н.П. Формирование химического состава подземных вод таликов (на примере Центральной Якутии). М.: Наука, 1971. 195 с.
5. Бойцов А.В. Геокриология и подземные воды криолитозоны. Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. 176 с.
6. Шепелев В.В., Ломовцева Н.С. Озера криолитозоны бестяхской террасы р. Лены и их взаимосвязь с подземными водами // Тематические и региональные исследования мерзлых толщ Северной Евразии. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1981. С.106–115.
7. Сайт метеорологических данных: <http://rp5.ru/6754/ru>.
8. Семерня А.А. Роль озерных вод в формировании источников подземных вод бестяхской террасы р. Лены (Центральная Якутия) // Геокриология – прошлое, настоящее, будущее. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2010. С. 93–98.
9. Справочное руководство гидрогелогa. 3-е изд., перераб. и доп. Т. 1/ В.М. Максимов, В.Д. Бабушкин, Н.Н. Веригин и др.; Под ред. В.М. Максимова. Л.: Недра, 1979. 512 с.
10. Скачков Ю.Б. Тенденции изменения климата Центральной Якутии на рубеже XX–XXI вв. // Региональный отклик окружающей среды на глобальные изменения в Северо-Восточной и Центральной Азии. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. С. 236–238.

*Поступила в редакцию 03.12.2015*

УДК 550.42:546.17 (571.56)

## Влияние атмосферных осадков на геохимию озерных систем г. Якутска

А.Л. Седельникова, В.Н. Макаров

*Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск*

*Озера, расположенные в селитебных районах, испытывают влияние как техногенных, так и климатических факторов, под воздействием которых формируются их химический состав, водный и солевой балансы. Приводятся данные о влиянии атмосферных осадков на геохимию городских озерных систем. В химическом составе озерных вод преобладают хлориды, гидрокарбонаты и ионы натрия. Величина минерализации воды крупных городских озер колеблется в пределах 0,34–0,91 г/л, достигая в некоторых озерах 2,3 г/л. При относительном постоянстве соотношения макрокомпонентов в химическом составе озерных вод концентрация ряда компонентов в озерах определяется химическим составом и объёмом атмосферных осадков. Рассмотрены особенности формирования гидрогеохимических полей в озерах, связанные с изменением климата. Установлено, что в последние годы наблюдается повышение кислотности и снижение величины минерализации воды озер, связанное с климатическими факторами: изменением качественных и количественных характеристик атмосферных осадков, увеличением объёма поступления катиона  $H^+$  из атмосферы. Прогнозируется тенденция к дальнейшему опреснению озерных вод и улучшению их качества. Снижение содержания макро- и микроэлементов наиболее существенно для сульфатов и уменьшается в ряду:  $SO_4^{2-} > Ca^{2+} > Cl^- > Na^+ > Mg^{2+}$ , рН. Неблагоприятная эколого-санитарная обстановка в городских озерах сохраняется для ионов натрия, аммонийных и нитритных соединений азота.*

*Ключевые слова:* озера, вода, донные отложения, осадки, макро- и микрокомпоненты, химический состав, геоэкология.

---

СЕДЕЛЬНИКОВА Алена Леонидовна – вед. инженер; МАКАРОВ Владимир Николаевич – д.г.-м.н., проф., зав. лаб., e-mail: makarov@mpi.ysn.ru.

## Influence of Atmospheric Precipitation on Geochemistry of City Lake Systems

A.L. Sedelnikova, V.N. Makarov

*Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk*

*Lakes in urban areas are subject to both anthropogenic and climatic influences that control their chemical composition, as well as water and salt balances. This study presents data on the influence of atmospheric precipitation on the geochemistry of urban lake systems. The chemical composition of lake water is dominated by chlorides, bicarbonates and sodium ions. Dissolved-solids concentrations in the larger lakes range from 0,34 to 0,91 g/l, reaching 2,3 g/l in some lakes. Although the ratios of major components in the lake water chemistry are relatively stable, concentrations of some components in the lakes depend on the chemical composition and amount of precipitation. The study indicates a recent increase in acidity and a decrease in dissolved-solids concentration in the lake waters related to climatic factors, such as the changes in qualitative and quantitative characteristics of precipitation and the increased atmospheric deposition of  $H^+$ -cation. It is predicted that the lake waters will continue freshening with their quality improved. The decline in major and minor element concentrations is most significant for sulfates and decreases in order:  $SO_4^{2-} > Ca^{2+} > Cl^- > Na^+ > Mg^{2+}$ , pH. The adverse ecologo-sanitary situation in the city lakes will remain for sodium ions, and ammonium and nitrite compounds of nitrogen.*

Key words: lakes, water, bottom sediments, precipitation, major and minor elements, chemical composition, environmental geology.

### Введение

Озерные воды в сильной мере испытывают влияние климатических факторов, под воздействием которых формируются их химический состав, водный и солевой балансы. Привносятся вещества в озера с метеорными водами, с одной стороны, и влияние на химизм вод озер количества атмосферных осадков – с другой, определяют широкий диапазон изменения минерализации и химического состава воды озер. В последние годы в Центральной Якутии наблюдается изменение климата, в том числе и устойчивое повышение количества осадков. В связи с этим интерес представляет оценка влияния атмосферных осадков на геохимию городских озерных систем.

### Материалы и методы

Геохимический мониторинг городских озерных систем (вода и донные отложения) и атмосферных осадков проводится лабораторией геохимии ИМЗ СО РАН с 1984 г. Отбор проб воды на химический анализ проводился согласно ГОСТ 17.1.3.07-82 и ГОСТ 17.1.5.04-81 «Приборы и устройства для отбора и первичной обработки и хранения проб природных вод» и ГОСТ Р 51592-2000 «Вода. Общие требования к отбору проб».

Пробы воды отбирались в пластиковые бутылки, промытые мыльной водой, которые затем полоскались 10–20 раз обычной и 3 раза дистиллированной водой. Перед отбором пробы воды бутылки обязательно ополаскивались 2–3 раза водой изучаемого озера.

Пробы донных отложений отбирались при помощи специального пробоотборника при глубине воды летом 0,5–0,6 м, зимой при глубине 1,5–1,8 м.

Круглогодичный мониторинг химического состава атмосферных осадков проводился на стационаре «Туймаада» ИМЗ СО РАН [1]. С поверхности всех озер города и с поверхности почвы прибрежных участков отбирались пробы снега. В каждом пункте проводилось измерение высоты и плотности снега, температуры воздуха и снега на поверхности и у льда (почвы).

Химические анализы отобранных проб выполнены в лаборатории геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU 0001.518584), аналитики Л.Ю. Бойцова и О.В. Шепелева. Определение геохимических показателей в образцах воды и грунтов проведено по методикам, прошедшим метрологическую аккредитацию и включенным в государственный реестр методик количественного химического анализа.

Все пробы воды, льда и снега пропускали через тройной фильтр диаметром 200–250 мм. Затем водную вытяжку разделяли на 3 части: первую направляли на определение микрокомпонентов, вторую – макрокомпонентов и биогенных составляющих, а третью – таких параметров, как pH, электропроводность, Eh, F, Sr, Ba, Li,  $P_2O_5$ ,  $Na^+$  и  $K^+$ .

Приближенно-количественный спектральный анализ микроэлементного состава донных осадков на 35 элементов и химический анализ воды (внешний контроль) проведены в Центральной геолого-аналитической лаборатории ГУП РС(Я) «Центргеоаналитика» (аттестат аккредитации РОСС RU 0001.511039). Атомно-эмиссионный анализ выполнен на спектроаналитической установке: генератор ДГ-2 (№280-69), спектрограф ДФС-8 (№760024), микроскоп МБС-9 (№854628). Определение ртути проводилось

атомно-адсорбционным методом на приборе РА-915 с нижним пределом обнаружения 5,0 мг/т.

Всего по принятой методике было отобрано более 600 проб воды и донных отложений озер. Геохимическая характеристика дана 40 озерам, расположенным на территории г. Якутска (рис. 1).

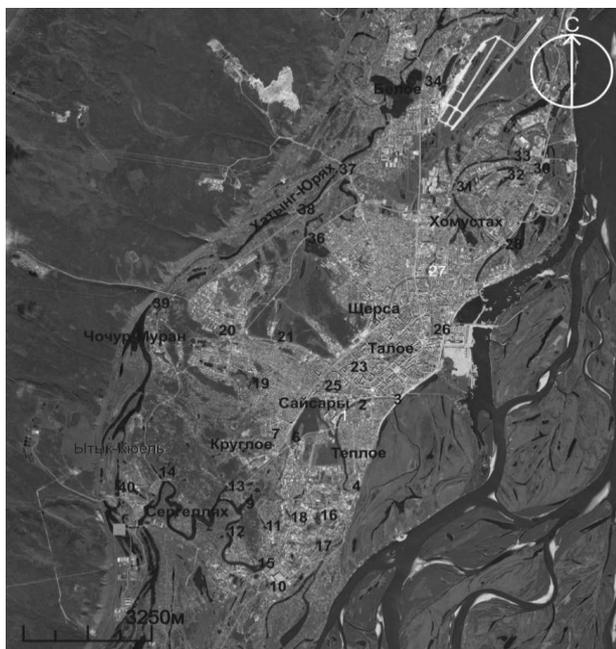


Рис. 1. Карта фактического материала  
Результаты исследований

По данным наблюдений на стационаре «Туймаада» ИМЗ СО РАН, в последние десятилетия, с 1980-х годов в районе г. Якутска отмечались значительные межгодовые колебания годовых сумм осадков, но в целом для города характерен положительный тренд осадков (рис. 2).

Химический состав озерных вод в период наблюдений оставался относительно постоянным гидрокарбонатно-хлоридным магниево-кальциевым (табл. 1).

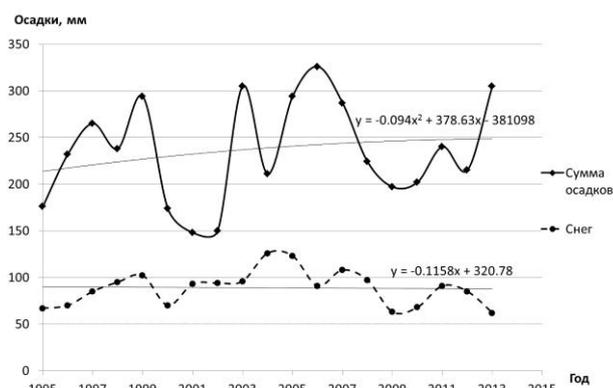


Рис. 2. Среднее годовое количество атмосферных осадков в г. Якутске

Анионную часть озерных вод (87–94%) примерно поровну формируют  $\text{Cl}^-$  и  $\text{HCO}_3^-$ . Среднее содержание гидрокарбонат-иона составляет 435 мг/л, а хлор-иона – 351 мг/л. Концентрация сульфат-иона в 3–4 раза меньше – 100 мг/л. Среди катионов преобладает натрий. Соотношение между катионами следующее:  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ . Среднее содержание  $\text{Na}^+$  – 181,  $\text{Mg}^{2+}$  – 46,  $\text{Ca}^{2+}$  – 45,  $\text{K}^+$  – 19 мг/л.

По данным мониторинга в районе города до 2007 г. преобладали слабокислые–слабощелочные осадки, кислотность которых изменялась в относительно узких пределах (6,77–7,37) и в среднем была практически нейтральной – 7,09. В этот период поступление кислых осадков с  $\text{pH} < 6,8$  от общего их количества составляло от 0 (1997 г.) до 58% (2004 г.). С 2008 г. и по настоящее время выпадающие осадки уже преимущественно слабокислые,  $\text{pH}$  в среднем – 6,63 (6,48–6,94) и поступление осадков с  $\text{pH} < 6,8$  от общей суммы атмосферных выпадений колеблется от 46% (2013 г.) до 83% (2008 г.). Кислотность как жидких, так и твердых осадков близка. В 2014 г. средняя величина  $\text{pH}$  дождевых вод составила 5,86, снеговых – 6,27.

По данным мониторинга озерных систем максимальная щелочность воды озер наблюдалась в 2003 г., когда средняя величина  $\text{pH}$  воды озер города составила 8,84 и достигла даже 9,37 в северной части озера Талое. Повышение щелочности озер в этот период связано с минимальным поступлением атмосферных осадков в предыдущие годы: 181–189 мм в 2001–2002 гг. и, соответственно, незначительным привнесом ионов водорода с осадками (табл. 2).

Увеличение объема поступления катиона  $\text{H}^+$  из атмосферы вызывает повышение кислотности почв, воды поверхностного стока [2] и изменение кислотности воды озер города (рис. 3).

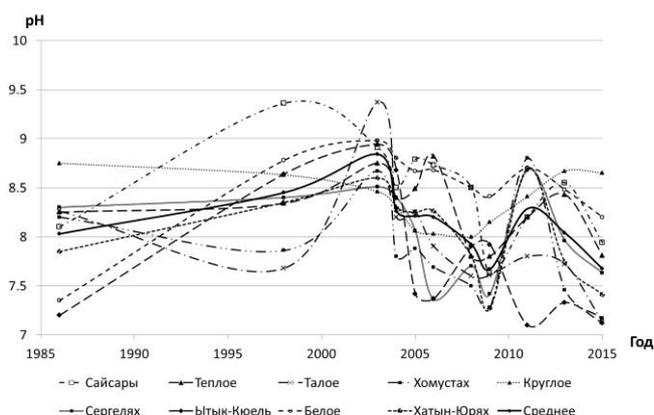


Рис. 3. Изменение величины  $\text{pH}$  в воде городских озер г. Якутска

Химический состав воды городских озер				
Минерализация, мг/л	1998 г.	2004 г.	2009 г.	2013 г.
		941	843	842
Формула Курлова	Cl 49 C 41 S10	Cl 55 C 32 S13	C 49 Cl 45 S6	Cl 47 C 45 S8
	Na61 Mg20 Ca13 K5	Na62 Mg23 Ca12 K3	Na59 Mg23 Ca15 K3	Na52 Mg24 Ca18 K4

Примечание. С –  $\text{HCO}_3^-$ ; S –  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Т а б л и ц а 2

### Изменение кислотности атмосферных осадков и воды городских озер

Год	Осадки, мм	Атмосферные осадки		Озера (n=40)	
		$\text{H}^+ \cdot 10^{-4}$ , г/м <sup>2</sup> /год	pH	$\text{H}^+$ , г·моль/л	pH
1998	238	0,25	7,11	$7,14 \cdot 10^{-9}$	8,13
2000	174	0,17	7,17	-	-
2001	148	0,16	7,37	-	-
2002	150	0,10	7,07	-	-
2003	305	0,44	7,06	$1,45 \cdot 10^{-9}$	8,84
2004	211	0,71	6,77	$5,49 \cdot 10^{-9}$	8,26
2005	294	0,45	7,06	$6,16 \cdot 10^{-9}$	8,21
2006	326	0,94	7,04	$6,31 \cdot 10^{-9}$	8,20
2007	287	0,36	7,08	-	-
2008	224	0,76	6,48	$1,20 \cdot 10^{-8}$	7,92
2009	197	0,70	6,63	$2,14 \cdot 10^{-8}$	7,67
2010	202	0,65	6,50	-	-
2011	240	0,85	6,55	$3,99 \cdot 10^{-9}$	8,40
2012	215	0,97	6,66	$1,58 \cdot 10^{-8}$	7,80
2013	305	0,42	6,94	$1,48 \cdot 10^{-8}$	7,83
Среднее	268	0,55	6,78	$7,59 \cdot 10^{-9}$	8,12
Годовой тренд				$0,048 \cdot 10^{-8}$	0,021

Несмотря на изменение содержания макрокомпонентов в озерных водах наблюдается относительное постоянство соотношения макрокомпонентов в их химическом составе.

Концентрация ряда компонентов в озерах непосредственно связана с количеством атмосферных осадков. Примером может быть прямая зависимость содержания минеральных форм азота в озерах от объёма поступлений соединений N (суммарная концентрация  $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$  в пересчете на N) из атмосферы (рис. 4).

В то же время между содержанием ряда компонентов в воде городских озер и количеством

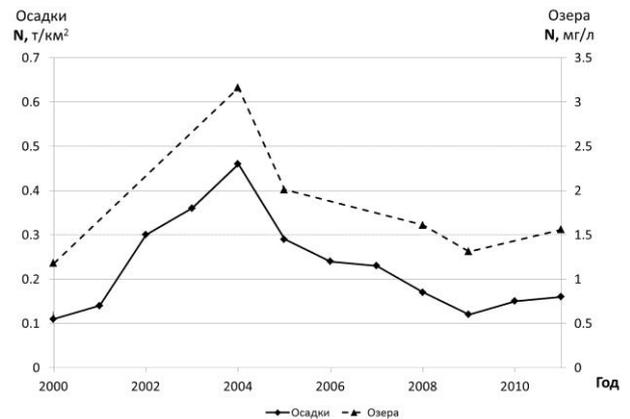


Рис. 4. Зависимость содержания минеральных форм азота в городских озерах от атмосферных выпадений

выпадающих атмосферных осадков наблюдается обратная взаимосвязь. Например, максимальное содержание меди в озерах отмечается в «засушливые» периоды, когда разбавление озерных вод осадками минимально, а поступление меди в озера с грунтовым стоком остаётся относительно постоянным (рис. 5).

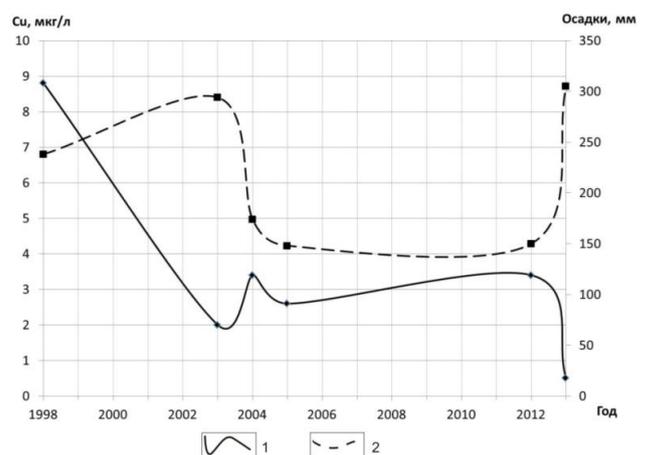


Рис. 5. Зависимость между содержанием меди в воде озер и атмосферными осадками: 1 – содержание Cu; 2 – атмосферные осадки

Величина минерализации воды крупных городских озер в период мониторинга колебалась в среднем в пределах 341–909 мг/л, при диапа-

Изменение величины минерализации воды крупных городских озер, мг/л

Озера	1998	2004	2005	2008	2009	2011	2013	Среднее
Сайсары	687	705	498	307	454	623	535	544
Хатынг-Юрях	933	742	453	309	370	634	686	590
Хомустах	1832	1122	774	770	2343	1136	1208	1312
Ытык-Кюель	485	1295	185	287	1101	314	156	546
Чочур-Муран	575	406	325	228	669	502	358	438
Сергелях	650	451	363	231	243	307	321	367
Белое	703	891	663	358	400	511	710	605
Талое	800	797	556	893	906	826	756	791
Теплое	1513	787	540	387	496	671	678	725
Среднее	909	799	484	341	775	614	601	658

зоне среднегодовых колебаний от 156 мг/л – оз. Ытык Кюель, 2013 г. до 2343 мг/л – оз. Хомустах, 2009 г. (табл. 3).

На протяжении последних 15 лет наблюдается отчетливая тенденция понижения величины минерализации озерных вод с величиной тренда около 17 мг/л в год (рис. 6).

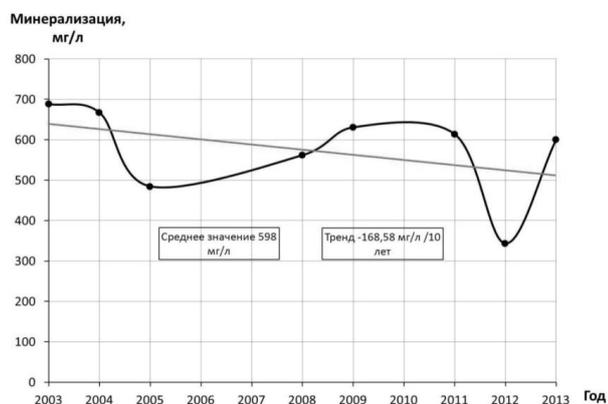


Рис. 6. Тренд изменения величины минерализации городских озер

### Выводы

Формирование химического состава воды городских озер Якутска определяется направленным изменением их качественных и количественных параметров (химического состава) под воздействием комплекса природных и техногенных факторов, преобразования и обмена миграционных форм ингредиентов в системе атмосфера–вода–порода–осадок. Концентрация ряда

компонентов в озерах напрямую зависит от объёма поступлений из атмосферы.

На протяжении последних 15 лет под влиянием изменения климата наблюдается отчетливая тенденция опреснения озерных вод с величиной тренда понижения минерализации воды около 17 мг/л в год. Снижение содержания макро- и микроэлементов наиболее существенно для сульфатов и уменьшается в ряду:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ , рН. Устойчивый положительный тренд изменения содержания установлен для соединений азота с темпом от 0,02 ( $\text{NH}_4^+$ ) до 0,08 мг/л год ( $\text{NO}_2^-$ ).

При сохранении современной тенденции формирования химического состава воды к 2020 г. в озерах понизится общая минерализация воды (в среднем до 480 мг/л) и концентрация всех макрокомпонентов и меди. Превышение рыбохозяйственных санитарных норм сохранится лишь для ионов натрия и соединений азота, главным образом, аммония и нитритов.

### Литература

1. Макаров В.Н. Геохимический мониторинг атмосферных осадков в Центральной Якутии / В.Н. Макаров. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2007. 88 с.
2. Чижук А.Л. Влияние изменения климата на химический состав воды городских озер Якутска / А.Л. Чижук, В.Н. Макаров // Труды Международной научно-практ. конф. «Перспективы развития науки и образования». Ч. 5. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес–наука–общество», 2014. С. 146–147.

Поступила в редакцию 23.11.2015