

УДК 556.114.6:546.28 (470.22)

КРЕМНИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ ГУМИДНОЙ ЗОНЫ (НА ПРИМЕРЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КАРЕЛИИ)

А. В. Рыжаков¹, В. В. Вапиров^{1,2}, И. А. Степанова¹

¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия

² Петрозаводский государственный университет, Россия

Впервые изучено распределение растворенных форм кремния в природных водах Карелии: мономерной ортокремниевой кислоты, поликремниевых кислот и кремния в составе растворенных органических соединений. Установлена линейная зависимость между концентрацией кремнийсодержащих органических соединений и косвенными характеристиками содержания органических веществ с коэффициентом корреляции, равным 0,85. Определена сезонная изменчивость концентрации общего растворенного кремния и соотношение его форм в разнотипных водных объектах на территории Карелии. Установлено, что наименьшее содержание растворенного кремния наблюдается в весенне-летний период в связи с продуцированием диатомового планктона. Предложена методика количественного определения кремния в составе органических соединений в природных водах с помощью персульфатного окисления в щелочном растворе.

Ключевые слова: поверхностные водные объекты Карелии; Онежское озеро и его притоки; формы кремния в природных водах; гумусовые вещества; диатомовые водоросли.

A. V. Ryzhakov, V. V. Vapirov, I. A. Stepanova. SILICON IN SURFACE WATERS OF THE HUMID ZONE (THE CASE OF KARELIAN WATERBODIES)

We report a first investigation of the following dissolved forms of silicon in natural waters of Karelia: monomeric orthosilicic acid, polysilicic acids and silicon within dissolved organic compounds. A linear relationship was found between the concentration of the silicon-bearing organic compounds and indirect characteristics of organic matter content, with the correlation coefficient at 0.85. The seasonal variation of total dissolved silicon concentration and the ratio of its forms in different types of water bodies in Karelia were determined. The content of dissolved silicon was the lowest in spring and summer due to diatom plankton production. A technique has been suggested for tallying silicon within organic compounds in natural waters using persulfate oxidation in alkaline solution.

Keywords: surface water bodies of Karelia; Lake Onego and its inflows; forms of silicon in natural waters; humic substances; diatoms.

Введение

Кремний является одним из самых распространенных элементов в земной коре. Его кларк составляет 28 % [Rudnich, Gao, 2004]. Силикаты и алюмосиликаты – это самый распространенный в природе класс минералов, на который приходится около 80 % массы земной коры. Обогащение кремнием природных вод происходит в основном в результате выщелачивания кремнийсодержащих пород. В связи с этим кремний относят к литофильным элементам. Подземные воды обычно более богаты кремнием, чем поверхностные. Что касается атмосферных осадков, то среднее содержание кремния в них не превышает 0,02 мгSi/л и они не вносят существенного вклада в поступление этого элемента в водные объекты [Лозовик, Потапова, 2006].

Наряду с фосфором и азотом кремний относится к биогенным элементам. Он участвует в построении костной ткани (скелета) живых организмов. Биологический круговорот кремния в природных водах обусловлен жизнедеятельностью диатомовых планктонных водорослей и последующим растворением их скелетов [Conley, 1997]. При разложении животных и растительных остатков он поступает обратно в водную среду. Однако в отличие от фосфора и азота кремний редко лимитирует процессы первичной продукции в природных водах. Известно, что он может ограничивать развитие планктона в весенне-летний период в фотическом слое, что наблюдается примерно в 10 % водных объектов на территории Карелии [Лозовик, 2006]. Содержание кремния в питьевой воде в России регламентировано и составляет 10 мг/л [СанПиН..., 2001]. В 80 % водоемов Карелии концентрация его растворенных форм намного ниже этого значения [Лозовик, 2006].

В водоемах кремний находится в растворенных и взвешенных формах. Растворенные формы представлены главным образом кремниевой (ортокремниевой) кислотой и ее ассоциатами (поликремниевыми кислотами). Последние имеют переменный состав $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$. Повышение концентрации ортокремниевой кислоты, понижение температуры и pH способствует процессу полимеризации. При количественном химическом анализе наибольшее аналитическое значение имеют именно эти формы, потому что они наиболее легко потребляются водными организмами. Кремний в составе органических веществ (ОВ) также может находиться в растворенном состоянии. Наибольшее значение среди таких соединений имеют ассоциаты кремниевой кислоты

с гумусовыми веществами, связь между компонентами в которых носит ковалентный характер и усиливается за счет возникновения водородной связи [Камбалина и др., 2014]. Логично предположить, что должна существовать корреляционная связь между концентрацией этих комплексов кремния и содержанием гумусовых веществ в природной воде. Взвешенный кремний – это отдельные частицы кремнийсодержащих материалов размером более 0,45 мкм. Взвешенные формы кремния (а также алюминия) являются основными компонентами минерального вещества, которое седиментирует в водном объекте [Линник, Дикая, 2014]. Количество взвешенных форм кремния в водоемах и водотоках Карелии в среднем достигает 0,6 мгSi/л, и их содержание может превышать концентрацию растворенных форм [Лозовик, 2006].

Целью данной работы являлось изучение содержания и сезонного распределения растворенных форм кремния в водоемах и водотоках на территории Карелии, которые принадлежат к поверхностным водам гумидной зоны.

Материалы и методы

Содержание растворенной кремниевой кислоты (в пересчете на Si) исследовано в 794 водных объектах (542 озера и 252 реки). Были использованы архивные и современные данные лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС за 1960–2017 гг. Также в 2017–2018 гг. проводились исследования различных растворенных форм кремния и их соотношения в Онежском озере, его заливах – Петрозаводской и Кондопожской губах и некоторых притоках северо-западного побережья озера – реках Шуге, Лососинке, Неглинке и Нелуксе (устье). Речные пробы отбирали с поверхностного горизонта, а озерные – с поверхностного и придонного. В фильтрованных пробах воды (фильтры мембранные «Владипор» МФАС-X-1; 0,45 мкм) определялись следующие формы: ортокремниевая кислота H_4SiO_4 , растворенная полимерная кремниевая кислота и общий растворенный кремний ($\text{Si}_{\text{общ}}$), включающий в том числе кремнийсодержащие растворенные органические соединения ($\text{Si}_{\text{орг}}$). Исследования в 2012 и 2017–2018 гг. проводились в сезонном плане для установления закономерностей изменения общего содержания и соотношения этих форм в зависимости от интенсивности протекания внутриводоемных процессов.

Определение растворенной кремниевой кислоты выполняли фотометрическим методом в виде желтой кремнемолибденовой кислоты

[Аналитические..., 2017]. Для определения растворенных поликремниевых кислот за основу брали методику [Камбалина и др., 2014]. К пробам воды объемом 50 мл в полипропиленовых сосудах добавляли по 1 мл раствора NaOH (2 моль/л), нагревали при 100 °С в течение 1 часа. После охлаждения нейтрализовали раствором HCl (5 моль/л) до значений pH 6,5–7,5, далее проводили определение кремниевой кислоты, как указано выше. Содержание поликремниевых кислот находили по разности концентраций кремния после гидролиза и в исходной воде.

Для количественного определения кремнийсодержащих органических соединений существует методика их фотохимической деструкции [Линник, Дикая, 2014]. Нами был использован другой способ минерализации этих веществ – с помощью персульфатного окисления в щелочной среде. Эта методика применяется, например, для количественного определения общего азота в природных водах [Аналитические..., 2017]. К пробам объемом 10 мл добавляли по 1 мл раствора NaOH (0,6 моль/л), 50 мг перекристаллизованного персульфата калия, помещали в герметично закрывающиеся тefлоновые автоклавы и нагревали при 170 °С в течение 20 минут и далее при 200 °С в течение 20 минут в микроволновой системе пробоподготовки Berghof speed wave (Германия). При этих условиях все органические вещества минерализуются, а образующуюся кремниевую кислоту после подкисления 0,5 мл раствора H₂SO₄ (0,5 моль/л) определяли фотометрическим методом в виде желтой кремнемолибденовой кислоты, как указано ранее. По разности концентраций растворенного общего кремния и других растворенных форм (ортокремниевой и поликремниевых кислот) рассчитывали содержание растворенного органического кремния (Si_{орг}). Значения цветности и перманганатной окисляемости (ПО) проб воды для расчета показателя гумусности проводили в соответствии с методиками [Аналитические..., 2017].

Результаты и обсуждение

Природные воды гумидной зоны содержат большое количество аллохтонного органического вещества. Это вносит свою специфику в общее содержание кремния, и особенно его растворенных форм.

Растворенная кремниевая кислота

Содержание растворенной кремниевой кислоты в поверхностных водах Карелии обычно не превышает 6, а среднее арифметическое

Таблица 1. Статистические характеристики содержания растворенной кремниевой кислоты в поверхностных водах Карелии [Лозовик, 2006; Озера..., 2013], мгSi/л

Table 1. Statistical characteristics of the dissolved silicic acid content in surface waters of Karelia [Lozovik, 2006; Lakes..., 2013], mgSi/l

Статистические показатели Statistical indicators	Реки Rivers	Озера Lakes	Все объекты All objects
Мин Min	0,0	0,0	0,0
Макс Max	6,1	9,6	9,6
Ср. арифм. Arithmetic mean.	2,3	1,6	1,8
Ср. геом. Geometric mean.	1,9	1,2	1,4
Медиана Median	2,1	1,4	1,7
Ст. откл. Standard deviation	1,3	1,2	1,3
1-й квартиль 1-st quartile	1,5	0,7	0,9
3-й квартиль 3-rd quartile	3,0	2,2	2,4
n	252	542	794

значение составляет 1,8 мгSi/л (табл. 1, рис. 1), что определяется низкой растворимостью SiO₂ в воде.

В 75 % объектов содержание H₄SiO₄ изменяется от 0 до 2,2 мгSi/л, причем это изменение имеет линейный характер, а распределение кремния в большинстве объектов соответствует нормальному, что указывает на его поступление главным образом за счет процессов выщелачивания из пород. Наибольшие концентрации H₄SiO₄ обнаружены в высокоэвтрофных озерах Пелдо и Иматозеро (бассейн р. Шуи) – около 7 и 10 мгSi/л соответственно, а минимальные наблюдаются в озерах с преобладанием атмосферного питания (Чучъярви, Голубая ламба, Девичья ламба и др.). В речных водах ее среднее арифметическое содержание составляет 2,3 мгSi/л, что несколько больше, чем в озерных (табл. 1). Более низкая концентрация кремниевой кислоты в озерных водах по сравнению с речными связана с ее потреблением фитопланктоном, седиментацией в составе последнего и захоронением в донных отложениях. В связи с тем, что содержание H₄SiO₄ в большинстве объектов меньше предела растворимости SiO₂, по-видимому, первый процесс все-таки является основным, а ее седиментация происходит незначительно.

В весенне-летний период в фотическом слое наблюдается наименьшее содержание

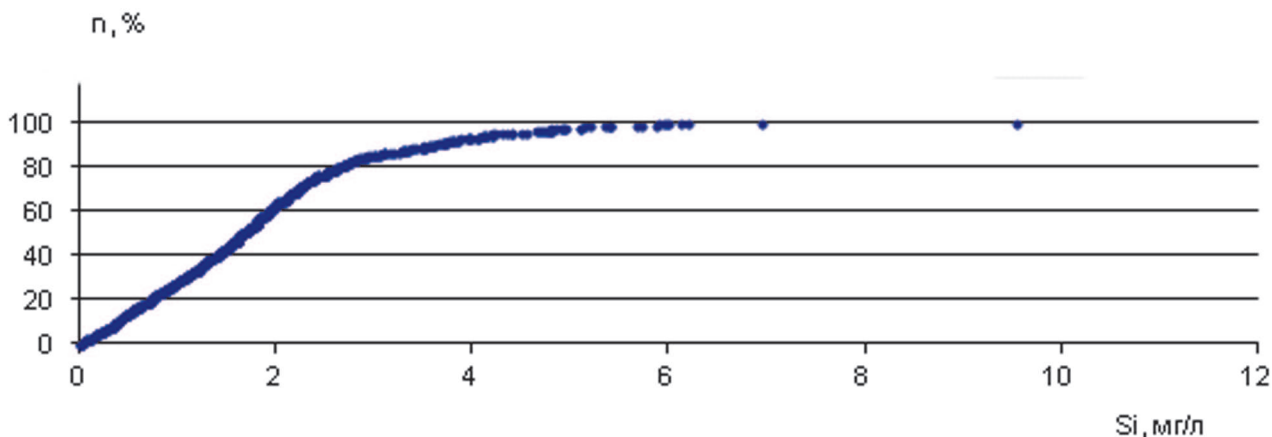


Рис. 1. Распределение содержания кремниевой кислоты (в пересчете на Si) в водных объектах Карелии (по накопленным процентам)

Fig. 1. Distribution of silicic acid content in water bodies of Karelia (by accumulated percentages)

растворенного кремния по сравнению с другими сезонами и придонными слоями воды. В связи с этим считается, что он может лимитировать развитие планктона при концентрации менее 0,2 мгSi/л [Schelske, 1976].

Значения концентраций растворенной ортокремниевой кислоты в разнотипных озерах Карелии в различные гидрологические сезоны 2012 г. представлены в таблице 2. Эти озера различаются своими гидрологическими характеристиками и химическим составом воды, в первую очередь содержанием биогенных элементов и ОВ, которые определяют их трофический статус [Озера..., 2013]. Максимальная концентрация кремниевой кислоты наблюдалась в большинстве озер в зимний период. Особенно заметна сезонная изменчивость для озер с более высоким содержанием H_4SiO_4 – Валгомозеро и Салонъярви. Весной и летом активизируется деятельность диатомового планктона, потребляющего растворенный кремний для своего роста, и его концентрация снижается. Для озер с невысоким содержанием этого элемента сезонные различия отмечаются слабее.

Растворенные поликремниевые кислоты

Исследования, выполненные в Петрозаводской губе Онежского озера и притоках, впадающих в нее (реках Шуе, Лососинке, Неглинке и Нелуксе), показали, что содержание растворенных поликремниевых кислот в их воде очень незначительно. Так, в пробах воды, отобранных осенью 2017 г. в Петрозаводской губе, концентрация ортокремниевой кислоты равнялась 0,59 и 0,53 мгSi/л в поверхностном и придонном горизонтах, а поликремниевых – только

Таблица 2. Концентрация растворенной кремниевой кислоты в исследованных озерах на территории Карелии в различные гидрологические сезоны 2012 г., мгSi/л

Table 2. Concentration of dissolved silicic acid in the studied lakes on the territory of Karelia in different hydrological seasons of 2012, mgSi/l

Озеро Lake	Зима Winter	Весна Spring	Лето Summer
Вегарусъярви Vegarussyarvi	2,9	1,9	1,8
Урозеро Urozero	0,2	0,3	0,3
Вендюрское Vendyurskoye	2,7	2,6	2,3
Урос Uros	0,2	0,3	0,2
Салонъярви Salonyarvi	2,7	1,7	1,7
Яндомозеро Yandomozero	0,8	0,3	0,9
Валгомозеро Valgomozero	3,0	2,6	0,2
Святозеро Svyatozero	0,5	0,5	0,5
Крошнозеро Kroshnozero	1,4	1,4	0,8

0,05 мгSi/л в обоих образцах. В воде р. Лососинки летом 2017 г. концентрации этих форм кремния были 2,58 и 0,02 мгSi/л соответственно. Результаты аналогичных опытов, проведенных в Петрозаводской губе в другие сроки и на других водных объектах (например, в центральной части Онежского озера, р. Шуе) в различные гидрологические сезоны 2017–2018 гг., также свидетельствуют о незначительной доле поликремниевых кислот (в среднем около 5 % от концентрации ортокремниевой

кислоты). Поэтому при дальнейших исследованиях определялись только растворенный кремний в виде ортокремниевой кислоты и общий растворенный кремний, а по разности их концентраций вычисляли содержание $Si_{орг}$.

Растворенный общий кремний и кремний в составе органических соединений

Результаты определения $Si_{общ}$ и $Si_{орг}$ представлены в таблице 3. Эти данные показывают, что глубоководная станция центральной части Онежского озера отличается наименьшим содержанием кремния, который практически полностью представлен растворенной кремниевой кислотой, а $Si_{орг}$ там отсутствует. Вода в центральной части озера характеризуется высоким качеством, она светлая и содержит незначительное количество других биогенных элементов (азота и фосфора) и ОВ. Для оценки качества воды водных объектов по классификации, разработанной в ИВПС П. А. Лозовиком и Н. Н. Филатовым [Озера..., 2013], используются показатели гумусности, щелоч-

ности и трофности. Согласно ей Онежское озеро является олигогумусным, олиготрофным, среднещелочностным водным объектом. Самая низкая концентрация H_4SiO_4 обнаружена летом 2018 г. (0,24 мгSi/л) в поверхностном горизонте, что связано с активным потреблением кремния диатомовым планктоном, как это было обнаружено на примере малых озер Карелии различного трофического статуса в гидрологические сезоны 2012 г. (см. ранее). Летом в придонных слоях содержание H_4SiO_4 почти в 2 раза выше, чем в поверхностном горизонте, и незначительно меньше, чем на этой же станции весной. В заливах Онежского озера (Петрозаводской и Кондопожской губах) речной сток увеличивает содержание биогенных элементов и ОВ по сравнению с центром озера. Соответственно, в этих губах обнаруживается кремний в составе органических веществ ($Si_{орг}$) (табл. 3). Его доля от общего кремния в большинстве исследованных водных объектов составляет 7–35 % в зависимости от сезона года и глубины.

Как и следовало ожидать, повышенное содержание $Si_{орг}$ отмечается в речных водах,

Таблица 3. Формы кремния и косвенные показатели содержания ОВ в исследованных водных объектах в 2017–2018 гг.

Table 3. Forms of silicon and indirect indicators of OM content in the studied water bodies in 2017–2018

Водный объект, горизонт Water body, horizon	Сезон Season	H_4SiO_4	$Si_{общ/tot}$	$Si_{орг/org}$	Цветность, град. Chromaticity, degrees	ПО, мгО/л COD _{Mn} , mgO/l
		мгSi/л mgSi/l				
Петрозаводская губа, 0,5 м Petrozavodsk Bay, 0.5 m	Лето 2017 г. Summer 2017	1,76	2,31	0,55	103	16,6
Петрозаводская губа, 28 м Petrozavodsk Bay, 28 m		1,77	2,22	0,45	91	16,5
Р. Шуя Shuya river	Зима 2018 г. Winter 2018	2,97	3,07	0,10	-*)	-
Р. Неглинка Neglinka river		3,86	5,34	1,48	-	-
Р. Нелукса Neluksa river		4,27	4,82	0,55	-	-
Р. Неглинка Neglinka river	Весна 2018 г. Spring 2018	4,04	11,08	7,04	-	-
Р. Шуя Shuya river		3,47	4,24	0,77	184	23,1
Петрозаводская губа, 0,5 м Petrozavodsk Bay, 0.5 m		1,33	1,61	0,28	94	11,5
Петрозаводская губа, 28 м Petrozavodsk Bay, 28 m		1,11	1,65	0,54	77	10,6
Кондопожская губа, 0,5 м Kondopoga Bay, 0.5 m		1,86	2,00	0,14	76	11,4
Кондопожская губа, 13 м Kondopoga Bay, 13 m		1,28	1,56	0,28	60	10,6
Онежское оз., центр, 0,5 м Lake Onego, center, 0.5 m		0,47	0,45	0	-	-

Таблица 3 (окончание)

Table 3 (continued)

Водный объект, горизонт Water body, horizon	Сезон Season	H ₄ SiO ₄	Si _{общ/tot}	Si _{опр/org}	Цветность, град. Chromaticity, degrees	ПО, мгО/л COD _{Mn} , mgO/l
			мгSi/л mgSi/l			
Онежское оз., центр, 57 м Lake Onego, center, 57 m		0,51	0,49	0	-	-
Р. Лососинка Lososinka river		0,84	1,60	0,76	-	-
Р. Шуя Shuya river		2,27	2,96	0,69	174	19,3
Р. Шуя Shuya river	Лето 2018 г. Summer 2018	1,50	2,08	0,58	140	16,6
Петрозаводская губа, 0,5 м Petrozavodsk Bay, 0.5 m		0,28	0,49	0,21	43	7,9
Петрозаводская губа, 28 м Petrozavodsk Bay, 28 m		0,33	0,46	0,13	44	7,1
Кондопожская губа, 0,5 м Kondopoga Bay, 0.5 m		1,17	1,38	0,21	76	15,1
Кондопожская губа, 13 м Kondopoga Bay, 13 m		0,50	0,52	0,02	51	9,5
Онежское оз., центр, 0,5 м Lake Onego, center, 0.5 m		0,24	0,29	0,05	36	8,3
Онежское оз., центр, 57 м Lake Onego, center, 57 m		0,40	0,59	0,19	33	15,7
Р. Шуя Shuya river		1,38	1,68	0,30	125	13,4
Р. Лососинка Lososinka river	Осень 2018 г. Autumn 2018	2,77	3,64	0,87	-	-
Р. Шуя Shuya river		2,01	2,45	0,44	178	17,1
Кондопожская губа, 0,5 м Kondopoga Bay, 0.5 m		1,60	1,65	0,05	72	14,5
Кондопожская губа, 13 м Kondopoga Bay, 13 m		1,66	1,72	0,06	72	12,6
Онежское оз., центр, 0,5 м Lake Onego, center, 0.5 m		0,39	0,39	0	31	6,4
Онежское оз., центр, 57 м Lake Onego, center, 57 m		0,39	0,43	0,04	31	6,4
Петрозаводская губа, 0,5 м Petrozavodsk Bay, 0.5 m		0,48	0,48	0	37	6,8
Петрозаводская губа, 28 м Petrozavodsk Bay, 28 m		0,49	0,58	0,09	36	6,8

Примечание. *) – нет данных.

Note. *) – parameters were not estimated.

обогащенных гумусовыми веществами. Так, в устье р. Неглинки, протекающей на территории г. Петрозаводска, весной 2018 г. концентрация общего кремния составляла более 11 мг/л и около 7 мг/л приходилось на долю Si_{опр}. Результаты таблицы 3 свидетельствуют, что сезонная динамика распределения кремнийсодержащих ОБ, по-видимому, в большей степени зависит от внешних факторов (например, от объема поступления вод с водосборной территории и их химического состава), чем

от участия этих веществ во внутриводоемном круговороте кремния.

Для характеристики ОБ аллохтонного происхождения в природных водах вводят величину гумусности (ед. гумусности) [Лозовик и др., 2007]. Было установлено, что этот показатель более информативен для оценки качественного и количественного состава ОБ, чем каждая из исходных косвенных характеристик. Нами построена зависимость содержания растворенного органического кремния от гумусности

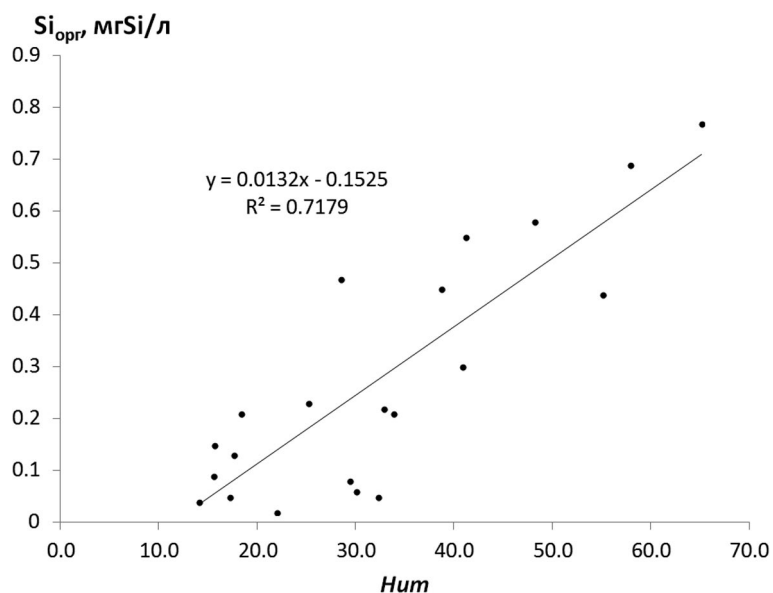


Рис. 2. Зависимость содержания растворенного органического кремния от гумусности воды

Fig. 2. The dependence of dissolved organic silicon content on water humus

воды (рис. 2). Получена линейная зависимость между этими показателями, которая подтверждает предположение о том, что значительная часть растворенного $Si_{орг}$ действительно присутствует в природных водах гумидной зоны в виде комплексов с гумусовыми веществами.

Таким образом, впервые для водных объектов, расположенных на территории Карелии, установлено содержание, распределение растворенных форм кремния и их сезонная динамика. Для определения кремния в составе органических соединений ($Si_{орг}$) предложена методика, основанная на минерализации органических веществ окислением их персульфатом калия в щелочной среде в микроволновой системе.

Выводы

1. Основной растворенной формой кремния в поверхностных водах Карелии является кремниевая (ортокремниевая) кислота, которая наиболее легко усваивается диатомовыми водорослями. Ее среднеарифметическая концентрация для всех исследованных водных объектов составляет 1,8 мгSi/л. Это значение в первую очередь определяется низкой растворимостью SiO_2 в воде.

2. Наименьшая концентрация растворенного кремния обнаруживается в летний период, что обусловлено активизацией роста диатомового планктона.

3. Содержание растворенных поликремниевых кислот в исследованных водоемах и водотоках составляет не более 10 % (в среднем 5 %) от концентрации ортокремниевой кислоты.

4. Содержание растворенных кремнийсодержащих органических соединений (главным образом в составе комплексов с гуминовыми веществами) в большинстве исследованных водных объектов изменяется в широких пределах и составляет от 0 до 35 % от общего содержания его растворенных форм. Его концентрация минимальна в низкогумусных водных объектах (Онежском озере и его заливах) и максимальна в речных водах, особенно в период весеннего половодья, что связано с высоким содержанием гумусовых веществ, поступающих с водосборной территории.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН).

Литература

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике / Под ред. П. А. Лозовика и Н. А. Ефременко. СПб.: Нестор-История, 2017. 270 с.

Камбалина М. Г., Скворцова Л. Н., Мазурова И. С., Гусева Н. В., Бакибаев А. А. Исследование форм на-

хождения кремния в природных водах с высоким содержанием растворенных органических веществ // Известия Томского политехнического университета. Химия и химические технологии. 2014. Т. 325, № 3. С. 64–70.

Линник П. Н., Дикая Т. П. Содержание, формы нахождения и особенности распределения и миграции кремния в поверхностных водах Украины // Водные ресурсы. 2014. Т. 41, № 6. С. 606–620. doi: 10.7868/S0321059614060133

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Дис. ... докт. хим. наук. М., 2006. 56 с.

Лозовик П. А., Морозов А. К., Зобков М. Б., Духовичева Т. А., Осипова Л. А. Аллохтонное и автохтонное органическое вещество в поверхностных водах Карелии // Водные ресурсы. 2007. Т. 34, № 2. С. 225–237.

Лозовик П. А., Потапова И. Ю. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 1. С. 111–118.

References

Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike [Analytical, kinetic, and computational methods in hydrochemical practice]. Lozovik P. A., Efremenko N. A. (eds.). St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2017. 270 p.

Kambalina M. G., Skvortsova L. N., Mazurova I. S., Guseva N. V., Bakibaev A. A. Issledovanie form nakhozhdeniya kremniya v prirodnykh vodakh s vysokim sodержaniem rastvorenykh organicheskikh veshchestv [Research of the silicon aqueous forms in organic-rich natural water]. *Izv. Tomsk. politekh. un-ta. Khimiya i khim. tekhnologii* [Bull. Tomsk Polytechnic Univ. Chemistry and Chemical Technology]. 2014. Vol. 325, no. 3. P. 64–70.

Linnik P. N., Dikaya T. P. Soderzhanie, formy nakhozhdeniya i osobennosti raspredeleniya i migratsii kremniya v poverkhnostnykh vodakh [Concentrations, coexisting forms, and features of silicon distribution and migration in surface waters of Ukraine]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2014. Vol. 41, no. 6. P. 606–620. doi: 10.7868/S0321059614060133

Lozovik P. A. Gidrogeokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ustoychivosti k antropogennomu vozdeistviyu [Hydrogeochemical criteria of the state of surface water in humid zone and their tolerance to anthropogenic impact]: DSc (Dr. of Chem.) thesis. Moscow, 2006. 56 p.

Lozovik P. A., Morozov A. K., Zobkov M. B., Dуховичева Т. А., Осипова Л. А. Allokhthonnoe i avtokhthonnoe organicheskoe veshchestvo v poverkhnostnykh vodakh Karelii [Allochthonous and autochthonous organic mat-

Озера Карелии. Справочник / Под ред. Н. Н. Филатова, В. И. Кухарева. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

СанПиН 1.2.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества. М., 2002. 62 с.

Conley D. J. Riverine contribution of biogenic silica to the oceanic silica budget // *Limnol. Oceanogr.* 1997. Vol. 42, no. 4. P. 774–777. doi: 10.4319/lo.1997.42.4.0774

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry* / Eds. H. D. Holland, K. K. Turekian. Amsterdam: Elsevier, 2004. Vol. 3. P. 1–64.

Schelske C. L. Silica and nitrate depletion as related to rate of eutrophication in lakes Michigan, Huron and Superiors // *Great Lakes Res. Divis. Collected Repr.* 1976. Vol. 5. P. 160–181.

Поступила в редакцию 16.11.2011

ter in surface waters in Karelia]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2007. Vol. 34, no. 2. P. 225–237.

Lozovik P. A., Potapova I. Yu. Postuplenie khimicheskikh veshchestv s atmosferymi osadkami na territoriyu Karelii [Input of chemical substances with atmospheric precipitation onto the territory of Karelia]. *Vodnye resursy* [Water Resources]. 2006. Vol. 33, no. 1. P. 111–118.

Озера Карелии. Справочник [Lakes of Karelia: a reference book]. N. N. Filatov, V. I. Kukharev (eds.). Petrozavodsk: KarRC RAS, 2013. 464 p.

СанПиН 1.2.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества [SanPiN 1.2.4.1074–01 Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control]. Moscow, 2002. 62 p.

Conley D. J. Riverine contribution of biogenic silica to the oceanic silica budget. *Limnol. Oceanogr.* 1997. Vol. 42, no. 4. P. 774–777. doi: 10.4319/lo.1997.42.4.0774

Rudnick R. L., Gao S. Composition of the Continental Crust. H. D. Holland, K. K. Turekian (eds.). *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2004. Vol. 3. P. 1–64.

Schelske C. L. Silica and nitrate depletion as related to rate of eutrophication in lakes Michigan, Huron and Superiors. H. D. Holland, K. K. Turekian (eds.). *Great Lakes Res. Divis. Collected Repr.* 1976. Vol. 5. P. 160–181.

Received November 16, 2018

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Рыжаков Александр Вадимович

заведующий лаб. гидрохимии и гидрогеологии, к. х. н.,
доцент
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: ryzhakov@nwpi.krc.karelia.ru
тел.: (8142) 576541

Вапиров Владимир Васильевич

ведущий научный сотрудник лаб. гидрохимии
и гидрогеологии, д. х. н., проф.
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030

заведующий кафедрой общей химии
Петрозаводский государственный университет
пр. Ленина, 33, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: vapirov@petsu.ru
тел.: (8142) 576541

Степанова Ирина Анатольевна

главный гидрохимик лаб. гидрохимии и гидрогеологии
Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: sia146@mail.ru
тел.: (8142) 576541

CONTRIBUTORS:

Ryzhakov, Alexander

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ryzhakov@nwpi.krc.karelia.ru
tel.: (8142) 576541

Vapirov, Vladimir

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia

Petrozavodsk State University
33 Lenin St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: vapirov@petsu.ru
tel.: (8142) 576541

Stepanova, Irina

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: sia146@mail.ru
tel.: (8142) 576541