

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2022 г. Е. А. Солдатова^{a, b, *}, И. С. Иванова^{a, **}, Ю. В. Колубаева^{a, ***}, Д. А. Соколов^{a, c, ****}

^aТомский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
пр. Академический, 4, Томск, 634055 Россия

^bТюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, 625003 Россия

^cИнститут почвоведения и агрохимии СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: 2a61@mail.ru

**e-mail: ivanovais_1986@mail.ru

***e-mail: kolubaeva@inbox.ru

****e-mail: Sokolovdenis@mail.ru

Поступила в редакцию 16.09.2021 г.

После доработки 10.03.2022 г.

Принята к публикации 14.03.2022 г.

На сегодняшний день одним из наиболее актуальных вопросов при исследовании арктических и субарктических территорий является изучение влияния таяния многолетней мерзлоты на высвобождение органического вещества и влияние данного фактора на геохимический облик водных систем. Помимо влияния на баланс углерода таяние многолетнемерзлых пород способствуют высвобождению и значительного количества других химических элементов, которые поступают в природные воды. В статье представлены результаты исследований химического состава поверхностных вод Ямало-Ненецкого автономного округа, относящегося к Арктической зоне Российской Федерации. Район исследований характеризуется не только наличием многолетнемерзлых пород, но и активным развитием нефтегазового комплекса. В связи с этим изучение особенностей формирования химического состава вод данной территории и определение их текущего эколого-геохимического состояния является важным аспектом для оценки антропогенного воздействия и прогнозирования влияния изменений климата на биогеохимические циклы химических элементов. В результате экспедиционных работ, проведенных в сентябре 2020 г., было отобрано 47 проб природных вод: 23 пробы из водотоков (рек, ручьев), 24 из водоемов (озер и просадок) в пределах бассейнов рек Таз, Пур, Обь и Надым. Объекты были выбраны таким образом, чтобы охватить систему озеро-ручей-река в пределах водосборных бассейнов основных рек ЯНАО. Химический состав был проанализирован в аккредитованной лаборатории стандартными методами, соответствующими поставленным задачам. Камеральная обработка данных производилась с применением методов математической статистики, в том числе анализ методом главных компонент (РСА). Анализ полученных данных показал, что на территории Ямало-Ненецкого автономного округа практически повсеместно распространены ультрапресные поверхностные воды с нейтральной и слабокислой реакцией среды. В ионном составе преобладают гидрокарбонат ион, кальций и магний, для просадок и озер высока доля аммония. При этом концентрации аммонийного азота характеризуются сильной положительной корреляцией со значениями РОУ, ХПК и ПОК. Установлено, что водотоки на исследуемой территории (реки и ручьи) отличаются от водоемов (озер и просадок) более высокими концентрациями макрокомпонентов (HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+), чье поступление обусловлено в основном природными факторами, а также значениями минерализации и pH, в то время как просадки характеризуются наиболее высокими концентрациями растворенного органического углерода и значениями других показателей (N-NH₄⁺, химического потребления кислорода, перманганатной окисляемости), связанных с поступлением органических веществ. Показано, что основными факторами формирования состава исследуемых вод являются их взаимодействие с минеральной составляющей подстилающих пород и почв и органическим веществом, поступающим из органогенных (торфяных) горизонтов почв. При этом первый фактор оказывает наибольшее влияние на водотоки, а второй на состав воды просадок. Повышенные же концентрации хлорид иона и натрия в водах наиболее крупных озер вероятно связаны с антропогенным воздействием.

Ключевые слова: органическое вещество, биогенные элементы, просадки, озера, реки, природные воды, Арктическая зона, Ямало-Ненецкий автономный округ

DOI: 10.31857/S0016752522100090

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из наиболее актуальных вопросов при исследовании арктических и субарктических территорий является изучение влияния таяния многолетней мерзлоты на высвобождение органического вещества из почв и торфов. Органическое вещество, поступающее в гидросферу в результате таяния многолетнемерзлых пород (ММП), оказывает влияние на геохимический облик водных систем (Моисеенко и др., 2017; Pokrovsky et al., 2020). Исследования показывают, что доля органического углерода наземных систем в пресноводных водоемах значительно увеличивается относительно вклада биоты самих водоемов в результате деградации ММП (Wauthy et al., 2018). Изотопные исследования также указывают на усиление мобилизации углерода захороненного органического вещества ММП, в следствие чего происходит обогащение им вод арктических рек (Feng et al., 2013). Помимо влияния, собственно, на баланс углерода, процессы, инициированные глобальными изменениями климата, способствуют высвобождению из ММП и значительного количества других химических элементов (Stepanova et al., 2015; Pokrovsky et al., 2020; Moiseenko et al., 2020; Lim et al., 2021, 2022). При этом остается открытым вопрос о масштабе перехода органического вещества и химических элементов из почв и торфов в водные системы, а также о формах их миграции. Данная проблема вызывает интерес не только в контексте изучения формирования химического состава поверхностных континентальных водных систем (Savichev et al., 2011; Савичев, Моисеева, 2016; Savichev et al., 2016; Krickov et al., 2020; Manasyrov et al., 2020; Moiseenko et al., 2020; Ivanova et al., 2021), но и при анализе массопереноса от континентальных водных систем к шельфовым территориям (Holmes et al., 2012; Perminova et al., 2019; Shiklomanov et al., 2021). В рамках исследований, проведенных авторами в пределах арктических территорий Западной Сибири на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО), изучен химический состав поверхностных вод (рек, термокарстовых озер, просадок). Основной целью исследований является анализ поведения растворенного органического вещества (РОВ) и биогенных элементов. Кроме того, изучение химического состава поверхностных водных объектов данного района несет и практическую значимость. Поверхностные водоемы используются здесь в качестве источников хозяйственно-бытового водоснабжения. По данным, опубликованным в официальных источниках (Государственный доклад..., 2021), в 2020 г. на территории ЯНАО вода 14 из 25 поверхностных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения (то есть более 50%), не соответствовала требованиям санитарных правил и гигиенических нормативов.

Таким образом, изучение особенностей формирования химического состава природных вод и определение их текущего эколого-геохимического состояния является важным аспектом как для оценки антропогенного воздействия на водные объекты, так и для дальнейшего прогнозирования возможной трансформации химического состава вод под влиянием климатических изменений, которые наиболее интенсивно проявляются в северных широтах (Решетько, Моисеева, 2016; Shiklomanov et al., 2021).

ОПИСАНИЕ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

В административном плане район исследований расположен на территории Ямало-Ненецкого автономного округа и приурочен к Арктической зоне Российской Федерации (Указ Президента..., 2014). Опробование водных объектов проводилось на территории водосборных бассейнов крупных рек региона (рр. Обь, Таз, Пур, Надым).

Равнинность и преобладание субмеридионального простирания орографических элементов преобладающей части севера Западной Сибири в сочетании с низким уровнем высот (35–55 м) препятствуют быстрому сбросу талых и дождевых вод (Сысо, 2007; Воскресенский, 1962), что способствует заболачиванию территории (Караваева, 1982).

В геологическом отношении район расположен в пределах молодой эпигерцинской Западно-Сибирской плиты. Нижний структурно-тектонический ярус образуют породы кристаллического фундамента, а верхний – толщу мезо-кайнозойского платформенного чехла. Большая часть территории исследований относится к верхнечетвертичным и среднечетвертичным равнинам морского, ледникового и ледниково-морского генезиса, представленные в основном среднесуглинистыми осадками (Лазуков, 1970), которые сменяются среднечетвертичными и верхнечетвертичными песчаными и супесчаными отложениями озерно-аллювиального и аллювиального генезиса (Атлас..., 1971). В составе пород присутствуют такие минералы, как хлорит и гидрослюды, в частности глауконит, минералы группы монтмориллонита и гидроокислов железа, пирит, сидерит.

Почвенный покров в основном представлен торфяными, преимущественно олиготрофными, реже эутрофными почвами, имеющими мощные торфяные горизонты (Shamilishvili et al., 2016). Температурный режим торфяных горизонтов почв, слагающих верхнюю часть почвенного профиля, значительно влияет на глубину залегания многолетней мерзлоты. Оттаивающая часть мерзлых пород становится частью почвенного профиля, в то время как высвобождающиеся элементы вовлекаются в почвенные и ландшафтно-геохи-

мические процессы. Мощность сезонно-талого слоя в период исследований составляла 50–85 см, что обусловлено географическим положением исследуемой территории, рельефом поверхности, а также составом растительных группировок.

МЕТОДЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

В сентябре 2020 г. на территории ЯНАО были проведены экспедиционные работы, в результате которых заложены 4 ключевых участка исследований. За период экспедиции было отобрано 47 проб природных вод: 23 пробы из водотоков (рек, ручьев), 24 из водоемов (озер и просадок). Под просадкой подразумевается форма микрорельефа, образовавшаяся при оттаивании высокольдистых ММП и заполненная водой. Данный процесс описывает начальную стадию формирования термокарстовых озер (Grosse et al., 2013).

Выбор объектов исследования объясняется стремлением охватить систему озеро-ручей-река в пределах водосборных бассейнов основных рек ЯНАО и рассмотреть химический состав вод объектов разных порядков. Схема опробования поверхностных вод представлена на рис. 1. В каждой точке опробования проводились измерения быстроменяющихся физико-химических показателей воды: температура, pH, электропроводность, окислительно-восстановительный потенциал (HI98194, HANNA Instruments). Пробы воды для исследования общего химического состава были отобраны в пластиковые бутылки объемом 1 л, предварительно трижды промытые исследуемой водой. Пробы для определения микрокомпонентов и концентрации углерода растворенных органических соединений (РОУ) были профильтрованы через мембранные ацетат-целлюлозные фильтры с размером пор 0,45 мкм в полипропиленовые пробирки объемом 45 мл и в стеклянные емкости объемом 100 мл соответственно. Для изучения соединений N и P пробы отбирались в стеклянные емкости объемом 500 мл и консервировались хлороформом. Для определения показателей ХПК (химического потребления кислорода) и ПОК (перманганатной окисляемости) пробы отбирались в стеклянные емкости объемом 200 мл и консервировались серной кислотой. До момента доставки в лабораторию пробы хранились в защищенном от света месте при температуре около 4°C.

Химический состав природных вод исследован в лаборатории гидрогеохимии Томского политехнического университета (г. Томск). Концентрации CO_2 , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} определены методом титрования. Содержания ионов аммония в при-

родных водах определялись фотометрическим методом (фотоколориметр КФК-2, ЗОМЗ, Россия), концентрации Na^+ , K^+ , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} и Cl^- определены с использованием метода ионной хроматографии (ионный хроматограф ICS-5000, Dionex, USA). Концентрация Mg^{2+} определена расчетным путем, исходя из значений общей жесткости и концентрации Ca^{2+} . Химическое потребление кислорода определено фотометрическим методом (анализатор Флюорат 02-3М, Люмэкс, Россия). Значение перманганатной окисляемости проанализировано титриметрическим методом. Содержание растворенного органического углерода проанализировано методом высокотемпературного каталитического окисления с использованием прибора Vario TOC cube (Elementar, Германия).

Камеральная обработка данных проводилась с применением методов математической статистики в программах MS Excel 2016 и Statistica 10. Наименование химического типа воды дано с учетом содержания макрокомпонентов более 25 мг-экв % в порядке убывания их концентрации. Фоновые концентрации рассчитывались с учетом закона распределения. Для статистического анализа значения, определенные как “ниже предела обнаружения”, были заменены на значения, равные половине от значения предела обнаружения компонента. Гипотеза о соответствии распределения нормальному или логнормальному закону принималась на основе нескольких критериев: визуальное соответствие гистограммы выборки закону распределения, визуальное соответствие квантильного графика выборки закону распределения; проверки по критериям хи-квадрат, Лиллиефорса (модифицированный критерий Колмогорова–Смирнова для проверки сложной гипотезы) и Шапиро–Уилка. Если больше половины из рассматриваемых критериев подтверждали гипотезу о нормальности распределения, в качестве оценки математического ожидания (фонового значения) принималось среднее арифметическое. Среднее геометрическое принималось для оценки фонового значения для компонентов, чье поведение описывается логнормальным законом. Если закон распределения не был определен достоверно, фоновая концентрация определялась на основе экспертной оценки, включающей в себя визуальную оценку гистограммы выборки, среднеквадратичного отклонения, стандартной ошибки и выбросов на основе диаграммы размаха, а также количества значений, определенных как “меньше предела обнаружения”. В качестве оценки фонового содержания для выборки с неизвестным законом распределения принималось среднее геометрическое, если распределение случайной величины близко к логнормальному, в противном случае за оценку математического ожидания

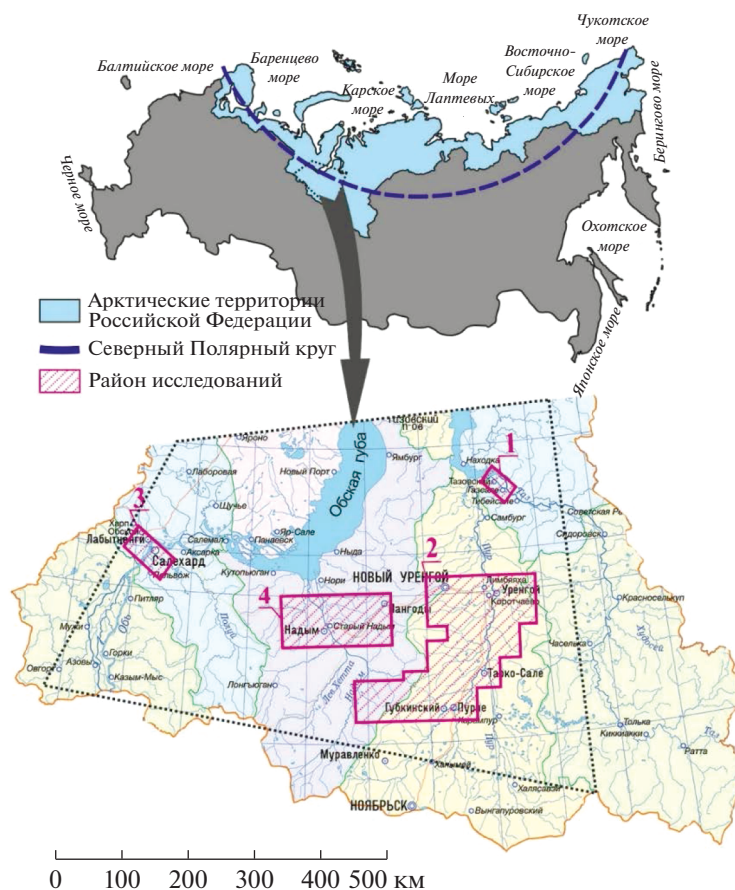


Рис. 1. Схема опробования поверхностных вод на территории ЯНАО в 2020 г. Опробованные водосборные бассейны: 1 – р. Таз; 2 – р. Пур; 3 – р. Обь; 4 – р. Надым.

принималась медиана. В случае, если в выборке присутствовало существенное количество значений ниже предела обнаружения, что делало невозможным достоверно оценить закон распределения, фоновое значение оценивалось как значение ниже предела обнаружения.

Для выявления зависимостей между поведением компонентов и показателей состава изучаемых вод был применен корреляционный анализ с применением рангового коэффициента корреляции Спирмена, поскольку распределение большинства физико-химических показателей отлично от нормального и объем выборки не очень большой. Для сравнения средних нескольких независимых выборок, представляющих собой физико-химические показатели различных объектов исследования (водотоков, водоемов, просадок), применялся непараметрический аналог однофакторного дисперсионного анализа – критерий Краскела–Уоллиса с объектом исследования в качестве группирующей переменной. Для сравнения средних в двух независимых группах данных применялся U-критерий Манна–Уитни, являющийся непараметрической альтернативой

t-критерия для двух независимых выборок. Для определения структуры взаимосвязей переменных (физико-химических показателей состава воды) и наблюдений (объектов исследования) и выявления скрытых общих факторов, объясняющих эти взаимосвязи, проведена классификация переменных при помощи факторного пространства методом главных компонент (РСА).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химический состав поверхностных вод арктической территории Западной Сибири

Исследуемые воды характеризуются широким диапазоном значений pH от сильнокислых до слабощелочных, при среднем значении 5.78 (табл. 1). Преимущественно встречаются воды со значениями pH, соответствующими слабокислой и нейтральной среде. По значению минерализации воды ультрапресные, лишь в двух точках значения минерализации превышают 100 мг/л (р. Малая Хадырьяха, р. Обь).

Изучаемые воды характеризуются достаточно высокими значениями показателей, определяю-

Таблица 1. Основные физико-химические показатели состава поверхностных вод ЯНАО, отобранных в сентябре 2020 г.

Номер пробы	Место отбора	pH	Мин.	CO ₂	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	РОУ	ХПК	ПОК
1. Водосборный бассейн р. Газ																		
983	р. Газ	7.17	94	<2	68.3	2.96	0.87	12.00	4.26	2.61	0.32	0.20	<0.02	<0.02	0.18	6.7	36.2	9.2
988	р. Вэсака-яха	6.3	31	<2	17.1	2.19	1.77	3.63	1.99	1.48	0.18	0.44	<0.02	0.07	0.054	18.1	48.1	18.4
990	р. Халыгахояха	6.87	46	<2	24.4	4.69	1.78	4.96	2.14	2.35	0.90	0.074	0.0021	2.42	0.024	7.2	25.7	3.2
993	р. Малая Хаяха	6.72	43	6.3	25.0	4.84	2.93	3.57	2.75	3.69	0.35	0.22	0.011	0.19	0.03	14.6	39.0	9.6
985	Ручей	6.1	14	<2	4.9	0.93	0.14	3.00	1.08	0.28	0.08	0.84	<0.02	0.052	0.013	21.3	48.7	30.8
986	Озеро	4.5	4	26.4	<2	1.02	0.4	1.23	0.70	0.28	0.04	0.74	0.0011	0.004	0.011	27.9	114.5	14.4
989	Озеро	6.05	21	6.2	13.1	1.82	0.57	3.00	0.90	1.09	0.14	0.22	<0.02	0.51	0.023	13.3	43.5	10.8
991	Озеро	5.65	19	9.6	11.6	2.24	0.52	4.00	0.80	0.16	0.06	1.86	0.0019	0.008	0.01	37.6	100.2	16
984	Просадка	4.38	2	31.7	<2	0.44	0.45	0.48	0.20	0.15	0.22	1.57	<0.02	<0.02	0.048	61.6	164.3	21.6
992	Просадка	5.22	7	—	2.4	0.79	2.14	0.96	0.18	0.09	0.20	1.79	0.0027	0.005	1.39	47.3	149.3	50.8
2. Водосборный бассейн р. Пур																		
994	р. Нгарка-Хадьгаяха	6.97	89	8.4	58.6	2.72	6.76	6.00	4.42	9.98	0.62	0.21	0.007	1.23	0.82	16.7	44.5	14.4
996	р. Малая Халыргьяха	6.99	140	4.4	87.8	3.13	15	9.84	6.22	16.57	1.77	0.063	<0.02	0.74	0.86	7.4	19.8	5.6
999	р. Лимбьяха	6.08	19	7.9	15.3	1.77	0.22	0.64	0.45	0.60	0.17	0.068	<0.02	1.31	0.28	8.2	26.3	5.6
1000	р. Ямсовей	6.51	26	5.3	17.1	2.59	0.62	2.00	1.41	1.48	0.40	0.072	<0.02	0.67	0.26	5.7	15.2	4.0
1004	р. Аймальяха	6.22	15	14.1	9.8	1.9	0.29	1.22	0.76	0.94	0.26	0.13	<0.02	1.66	0.2	8.9	20.2	8.96
1005	р. Пур	5.52	19	32.6	12.2	2.69	0.37	1.44	1.69	0.75	0.01	1.48	<0.02	0.0033	<0.1	15.4	82.6	28.8
1021	р. Селэ-яха	6.11	14	13.2	9.8	1.73	0.18	0.90	0.69	0.56	0.14	0.51	<0.02	<0.02	0.013	11.5	30.9	10.6
1022	р. Евояха	6.48	23	5.3	14.6	3.43	1.18	1.34	0.88	1.28	0.39	0.059	<0.02	<0.02	<0.1	5.3	14.2	6.7
1026	р. Панкитьяха	4.35	24	7.0	<2	22.7	0.26	0.38	0.27	0.30	0.13	0.99	<0.02	0.041	<0.1	23.6	96.5	11.8
1027	р. Пурле	6.37	24	13.2	16.0	1.6	1.96	1.32	1.02	2.22	0.28	0.103	<0.02	<0.02	0.11	9.5	26.7	9.1
1029	р. Алоку-яха	4.98	9	7.0	6.1	2.17	0.17	0.24	0.19	0.40	0.03	0.27	<0.02	0.13	<0.1	12.0	32.5	13.1
995	Озеро	6.14	6	7.0	2.4	1.21	0.73	0.68	0.18	0.27	0.41	0.46	0.0024	0.008	0.14	8.9	27.5	6.8
997	Озеро	5.27	12	12.3	4.9	1.2	2.16	0.41	0.38	2.45	0.08	0.071	0.0018	0.015	0.12	6.7	20.7	4.4
998	Озеро	5.96	17	7.0	14.6	1.07	0.37	0.17	0.19	0.91	0.06	0.2	0.0017	0.19	<0.1	9.9	32.6	7.2
1001	Озеро	5.22	7	11.4	4.9	1.81	0.1	0.18	0.12	0.22	0.14	0.11	<0.02	<0.02	<0.1	6.6	17.7	5.6
1002	Озеро	5.42	10	28.2	7.3	1.85	0.23	0.35	0.10	0.33	0.02	2.05	<0.02	0.058	0.09	44.2	118	23.2
1023	Озеро	6.25	15	4.8	9.8	1.04	1.19	0.58	0.85	1.26	0.08	1.56	<0.02	<0.02	<0.1	9.7	30.5	7.5
1024	Озеро	4.1	2	11.4	<2	1.6	0.2	0.22	0.11	0.14	0.02	0.66	<0.02	<0.02	<0.1	40.8	126	44.8
1028	Озеро	4.44	7	9.7	<2	5.93	0.23	0.22	0.26	0.29	0.12	0.44	<0.02	<0.02	<0.1	15.1	120	17.6
1025	Просадка	3.93	3	22.9	<2	1.98	0.34	0.13	0.07	0.25	0.26	1.13	<0.02	0.019	<0.1	49.1	161	49.6
1031	Просадка	4.06	9	14.1	<2	7.86	0.48	0.17	0.08	0.32	0.04	1.13	<0.02	<0.02	<0.1	30.1	90.3	33.6

Таблица 1. Окончание

Номер пробы	Место отбора	pH	Мин.	CO ₂	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	PO ₄	мгО ₂ /дм ³	
																	ХПК	ПОУ
3. Водосборный бассейн р. Обь																		
1008	р. Ханмей	7.25	37	2.6	22.0	7.91	0.42	4.16	1.30	1.05	0.32	0.17	<0.02	0.22	<0.1	4.6	12.3	3.2
1009	ручей	6.13	18	9.7	11.0	2.15	0.62	1.58	1.65	1.34	0.03	1.08	<0.02	<0.02	<0.1	26.3	98.5	18.4
1010	р. Обь	7.85	130	3.5	85.4	8.39	6.1	14.90	4.89	9.40	0.82	0.076	<0.02	<0.02	<0.1	3.8	20.3	6.4
1011	р. Васьеган	6.22	32	28.2	19.5	2.82	2.02	2.62	1.36	2.90	0.43	0.32	<0.02	0.58	0.17	9.2	24.7	9.6
1012	р. Нядаяха	5.54	11	30.8	6.10	1.91	0.18	1.64	0.78	0.25	0.04	0.53	<0.02	0.071	0.016	16.4	52	15.2
1006	Система неглубоких озер	6.40	24	5.28	14.6	1.83	1.49	2.31	1.17	2.04	0.32	0.15	<0.02	0.28	0.16	10.2	27.3	10.8
1007	Озеро	6.10	28	7.0	22.0	2.11	0.26	1.26	1.28	0.77	0.11	0.59	<0.02	0.78	0.011	12.8	31	14.4
1013	Озеро	5.96	11	15.0	7.32	1.61	0.13	1.22	0.69	0.26	0.22	0.22	<0.02	1.73	0.039	8.7	26	7.2
1014	Озеро	5.63	7	15.0	3.66	0.92	0.15	1.30	0.64	0.26	0.16	0.33	<0.02	1.73	0.077	17.9	45	23.2
1032	оз. Кирилл-Выслор	5.37	33	27.3	6.10	3.02	14.2	1.56	0.80	6.72	0.22	0.15	<0.02	<0.02	<0.1	6.2	19.3	3.7
1015	Просадка	3.89	16	1.9	<2	6.97	0.54	1.17	0.42	0.77	0.58	2.95	<0.02	<0.02	0.2	95.2	254	9.8
1016	Просадка	5.97	35	26.4	22.0	4.14	0.33	3.20	2.02	2.69	0.13	1.61	<0.02	<0.02	0.021	37.1	120	37.6
4. Водосборный бассейн р. Надым																		
1017	р. Маханял Пусьяха	6.6	68	10.6	36.6	18.2	0.28	5.65	3.99	2.67	0.92	0.25	<0.02	0.93	0.13	3.2	4.6	3.0
1018	р. Гьяха	5.86	15	5.2	9.20	3.18	0.27	0.84	0.67	0.87	0.20	0.18	<0.02	0.61	0.028	10.3	26.8	11.4
1019	Озеро	5.50	13	7.0	8.54	3.00	0.31	0.37	0.35	0.57	0.20	0.67	<0.02	0.22	<0.1	11.2	33.7	10.2
1020	Просадка	5.06	7	2.6	1.22	3.06	1.21	0.76	0.65	0.16	0.12	3.90	<0.02	0.065	<0.1	12.2	414	168
Среднее значение		5.78	17	9.7	12.1	2.17	0.62	1.21	0.70	0.82	0.16	0.38	<0.02	<0.02	0.07	13.7	44.1	12.1
Минимальное значение		3.89	2	1.9	1.22	0.44	0.10	0.13	0.067	0.093	0.005	0.06	0.001	0.003	0.01	3.2	4.6	3.0
Максимальное значение		7.85	140	32.6	88.0	22.7	15.0	14.90	6.22	16.57	1.77	3.90	0.011	2.42	1.39	95.2	414	168

Примечания. Минн. – минерализация, “-” – нет данных, мешающее влияние окраски исследуемой воды.

щих содержание органических веществ. Так, значение ХПК достигает $414 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$, в подавляющем большинстве точек опробования оно превышает допустимые нормы, установленные для поверхностных источников, используемых для рекреационного водопользования (ПДК_{рв} $15 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ (СанПиН 1.2.3685-21)). В точке с максимальным значением ХПК наблюдается и самое высокое значение ПОК ($168 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$) (просадка 1020, табл. 1). Максимальная концентрация РОУ (95.2 мг/л) также характерна для просадки (1015). Максимальные концентрации РОУ характерны в основном для просадок, реже озер и ручьев. Похожая зависимость прослеживается также для ХПК и ПОК. Полученные данные по содержанию РОУ в целом соответствуют значениям, полученным ранее для рек и термокарстовых озер зон сплошного и прерывистого развития ММП Западно-Сибирской низменности (Manasypov et al., 2015, 2020; Pokrovsky et al., 2015). Концентрации CO_2 , которые косвенно свидетельствуют о протекании процесса минерализации органического вещества, в изучаемых водах меняются в пределах $1.9\text{--}32.6 \text{ мг/л}$ при среднем значении 9.7 мг/л . Эти значения соответствуют концентрациям CO_2 , определенным в работе (Manasypov et al., 2020) в весенний и летний периоды в водах термокарстовых озер, расположенных в зоне сплошного распространения ММП, и значительно превышают таковые, определенные в водах термокарстовых озер зоны прерывистого распространения многолетней мерзлоты.

Катионный состав разнообразен, но чаще встречаются кальциево-магниевые и магниевые кальциевые воды, натрий редко является преобладающим катионом. Однако здесь следует отметить, что существенную роль в химическом составе исследуемых вод играет также ион аммония.

Концентрации N-NH_4^+ варьируют от 0.05 до 3.03 мг/л при среднем значении 0.3 мг/л . В 19 точках опробования содержание N-NH_4^+ превышает норматив, установленный для водных объектов рыбохозяйственного значения – ПДК_{рх} 0.4 мг/л (Приказ..., 2016). Максимальные концентрации иона аммония характерны для просадок 1015 и 1020 (табл. 1). Помимо просадок, высокая доля иона аммония характерна и для озер, и редко для достаточно крупных рек (р. Пур, р. Панкитъяха). В этих же объектах наблюдаются высокие значения ХПК (более $80 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$), что еще раз указывает на то, что процессом, ведущим к обогащению природных вод ионом аммония, является минерализация органического вещества. Ввиду низкой минерализации вод, при учете иона аммония в катионном составе его доля достигает в некоторых точках 70% от содержания катионов. Это указывает на важную роль органического вещества в формировании состава изучаемых вод, по-

скольку ион аммония является первой ступенью минерализации азотсодержащего органического вещества (Li et al., 2012; Zhu et al., 2015; Сорокин, Александров, 2013). В подтверждение, аммонийная форма является преобладающей в балансе соединений азота в исследуемых водах, что указывает на постоянное поступление органического вещества в воду и на благоприятные условия для его накопления (отсутствие растворенного кислорода, замедленный водообмен). Также следует отметить, что содержание аммонийного азота в изученных поверхностных водоемах значительно превышает концентрации, приведенные в работе (Vorobyev et al., 2017), полученные по результатам опробования 2015 г.

В анионном составе в основном преобладает гидрокарбонат-ион: встречаются собственно гидрокарбонатные воды, реже гидрокарбонатно-сульфатные и гидрокарбонатно-хлоридные воды. В некоторых точках среди анионов преобладает сульфат – встречаются собственно сульфатные воды, редко сульфатно-гидрокарбонатные и сульфатно-хлоридные воды. Преобладание сульфат-иона обычно характерно для просадок. В двух точках опробования отмечено преобладание хлорид-иона (просадка и оз. Кирилл-Выслор). Повышенные концентрации хлорид-иона приурочены к районам с развитым нефтегазодобывающим комплексом и зоне влияния нефте- и газопроводов, таким образом, наиболее вероятно, они носят антропогенный характер. Такой вывод сделан на основе анализа многолетних наблюдений в районах нефтегазодобычи (Московченко, 2007; Московченко и др., 2008). Повышенные относительно фона содержания хлорид-иона приурочены в основном к просадкам и рекам. Концентрации нитрит-иона в пересчете на N не превышают 0.006 мг/л , а содержания N-NO_3^- редко превосходят 0.05 мг/л . Наиболее высокие концентрации нитратов приурочены к речным водам. Концентрации фосфат-иона также достаточно низкие и лишь в нескольких точках превышают 0.05 мг/л в пересчете на фосфор (ПДК_{рх} для олиготрофных водоемов) (Приказ..., 2016), в основном эти точки относятся к водам рек бассейна р. Пур, отобранных вблизи п. Уренгой. Данная особенность химического состава вод весьма вероятно связана с условиями инженерного освоения территории. Высокие концентрации фосфатов характерны для четвертой морской террасы, песчаные отложения которой используются для обустройства месторождений (отсыпки кустов, строительство подъездных дорог) и с поверхностным и подземным стоком могут поступать в водоемы. В целом, концентрации нитратного азота и фосфатов соответствуют данным, полученным (Vorobyev et al., 2017) для малых рек бассейнов

рр. Обь, Таз и Пур, протекающих в зонах сплошного и прерывистого распространения ММП.

Результаты статистического анализа

Для проверки статистической значимости указанных закономерностей, а также для выявления более сложных зависимостей и факторов, влияющих на формирование химического состава воды объектов исследования, был применен ряд статистических методов.

Корреляционный анализ показал положительную связь между основными катионами и анионами химического состава и значениями минерализации и рН (табл. 2), исключение в данном случае составляет только сульфат-ион, для которого корреляционная связь с рН отсутствует. Указанные корреляции являются отражением процессов взаимодействия между водой и породой (минеральным субстратом). При этом отсутствие корреляции между содержанием сульфат-иона и рН говорит о более сложных процессах, влияющих на поступление SO_4^{2-} в воду, нежели растворение породы. Концентрации основных катионов и анионов также связаны между собой корреляциями разной силы. Наиболее сильная корреляция характерна для содержаний Ca^{2+} и Mg^{2+} . Наиболее слабые корреляции характерны для K^+ с SO_4^{2-} , Cl^- . Закономерна и отрицательная корреляция концентрации растворенной углекислоты со значением рН и концентрациями основных ионов, которая объясняется балансом растворенных карбонатных форм (CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-}) в зависимости от рН водного раствора. Следует отметить достаточно высокое значение корреляции между концентрацией хлорид-иона и натрия. Данная корреляция сильнее, чем зависимости между концентрацией Cl^- и остальными катионами, анионами и значением минерализации, что свидетельствует о том, что обогащение вод Na^+ может быть результатом антропогенного воздействия наряду с хлорид-ионом (Московченко, 2007).

Показатели, отражающие поступление органического вещества (РОУ, ХПК, ПОК) демонстрируют сильную корреляцию между собой ($r = 0.93$ между РОУ и ХПК, $r = 0.88$ между ХПК и ПОК, $r = 0.87$ между РОУ и ПОК) и практически идентичную структуру корреляционных связей с другими компонентами и показателями состава поверхностных вод. Сильная положительная взаимосвязь наблюдается между РОУ, ХПК, ПОК и концентрацией аммонийного азота, структура корреляционных взаимосвязей которого практически повторяет корреляции ПОК (табл. 2). Отрицательная корреляция отмечена между РОУ,

ХПК, ПОК и концентрациями основных катионов, HCO_3^- и значениями рН и минерализации, слабая отрицательная корреляция также характерна для нитратного азота. Для нитратного азота также характерна слабая положительная взаимосвязь с концентрациями K^+ , HCO_3^- , показателями рН и минерализации.

Принимая во внимание выявленные закономерности, были оценены различия между группами изученных объектов. Основными группами объектов в данном случае являются водотоки (реки и ручьи), водоемы (озера) и просадки (в большинстве случаев точечные объекты). Тест Краскела–Уоллеса для сравнения нескольких независимых выборок показал, что различия между указанными тремя группами являются статистически значимыми по значениям рН, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , N-NH_4^+ , РОУ, ХПК, ПОК и минерализации (рис. 2, 3). Далее необходимо было проверить проявляются ли эти различия между всеми тремя группами или действительно только для определенных пар. Для этого был использован U-критерий Манна–Уитни для сравнения двух независимых выборок. Было выявлено, что между водотоками и просадками все указанные различия являются статистически значимыми, кроме разницы между средними концентрациями сульфат-иона. При этом значения средних и дисперсии основных показателей химического состава (рН, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , минерализация) в водотоках превышают аналогичные для вод просадок (рис. 2), тогда как значения средних и дисперсии N-NH_4^+ , РОУ, ХПК и ПОК выше для вод просадок (рис. 3).

Между водотоками и водоемами статистически значимыми являются только отличия между концентрациями HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и значениями рН и минерализации. Средние значения и дисперсии всех перечисленных показателей для водотоков превышают аналогичные значения для водоемов (рис. 2). По показателям N-NH_4^+ , РОУ, ХПК и ПОК статистически значимых отличий между водоемами и водотоками не отмечается (рис. 3). Разница между водоемами и просадками выражается в статистически значимых отличиях между средними концентрациями HCO_3^- , N-NH_4^+ , РОУ и значениями рН, ХПК, ПОК. Значения средних и дисперсии показателя рН и концентрации HCO_3^- выше для водоемов, в то время как воды просадок характеризуются существенно более высокими средними значениями и дисперсией N-NH_4^+ , РОУ, ХПК и ПОК, чем водоемы.

Таблица 2. Значения коэффициентов ранговой корреляции Спирмена между показателями состава поверхностных вод ЯНАО

Показатель	pH	CO ₂	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca	Mg	Na	K	Мин.	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	P-PO ₄ ³⁻	РОУ	ХПК	ПОК
pH	1.00	-0.45	0.88	0.20	0.43	0.76	0.81	0.71	0.58	0.77	-0.57	0.37	0.21	-0.62	-0.63	-0.54
CO ₂	-0.45	1.00	-0.34	-0.30	-0.30	-0.33	-0.33	-0.27	-0.35	-0.40	0.25	-0.20	-0.11	0.29	0.19	0.27
HCO ₃ ⁻	0.88	-0.34	1.00	0.40	0.38	0.74	0.84	0.79	0.47	0.88	-0.52	0.39	0.15	-0.53	-0.53	-0.46
SO ₄ ²⁻	0.20	-0.30	0.40	1.00	0.22	0.34	0.38	0.44	0.35	0.57	-0.11	0.12	0.02	-0.22	-0.15	-0.20
Cl ⁻	0.43	-0.30	0.38	0.22	1.00	0.46	0.47	0.61	0.49	0.49	-0.23	-0.12	0.36	-0.22	-0.17	-0.25
Ca ²⁺	0.76	-0.33	0.74	0.34	0.46	1.00	0.92	0.62	0.50	0.79	-0.29	0.21	0.03	-0.30	-0.31	-0.26
Mg ²⁺	0.81	-0.33	0.84	0.38	0.47	0.92	1.00	0.76	0.45	0.85	-0.35	0.26	0.02	-0.39	-0.38	-0.32
Na ⁺	0.71	-0.27	0.79	0.44	0.61	0.62	0.76	1.00	0.51	0.86	-0.55	0.28	0.29	-0.52	-0.55	-0.54
K ⁺	0.58	-0.35	0.47	0.35	0.49	0.50	0.45	0.51	1.00	0.53	-0.51	0.35	0.44	-0.49	-0.50	-0.56
Мин.	0.77	-0.40	0.88	0.57	0.49	0.79	0.85	0.86	0.53	1.00	-0.47	0.33	0.16	-0.48	-0.50	-0.50
N-NH ₄ ⁺	-0.57	0.25	-0.52	-0.11	-0.23	-0.29	-0.29	1.00	-0.47	-0.47	1.00	-0.45	-0.29	0.81	0.84	0.77
N-NO ₃ ⁻	0.37	-0.20	0.39	0.16	-0.42	-0.33	-0.42	-0.45	1.00	0.33	-0.45	1.00	0.16	-0.33	-0.42	-0.31
P-PO ₄ ³⁻	0.21	-0.11	0.15	1.00	0.16	0.16	1.00	-0.24	-0.23	0.16	-0.29	1.00	1.00	-0.24	-0.23	-0.25
РОУ	-0.62	0.29	-0.53	-0.24	-0.23	1.00	1.00	0.93	0.87	0.93	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
ХПК	-0.63	0.19	-0.53	-0.23	-0.23	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
ПОК	-0.54	0.27	-0.46	-0.20	-0.25	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31

Примечания. Оттенками серого показана сила корреляционной связи при $p < 0.05$ — от слабой светло-серым к очень сильной темно-серым; очень слабые и статистически незначимые связи при $p < 0.05$ не обозначены. Мин. — минерализация.

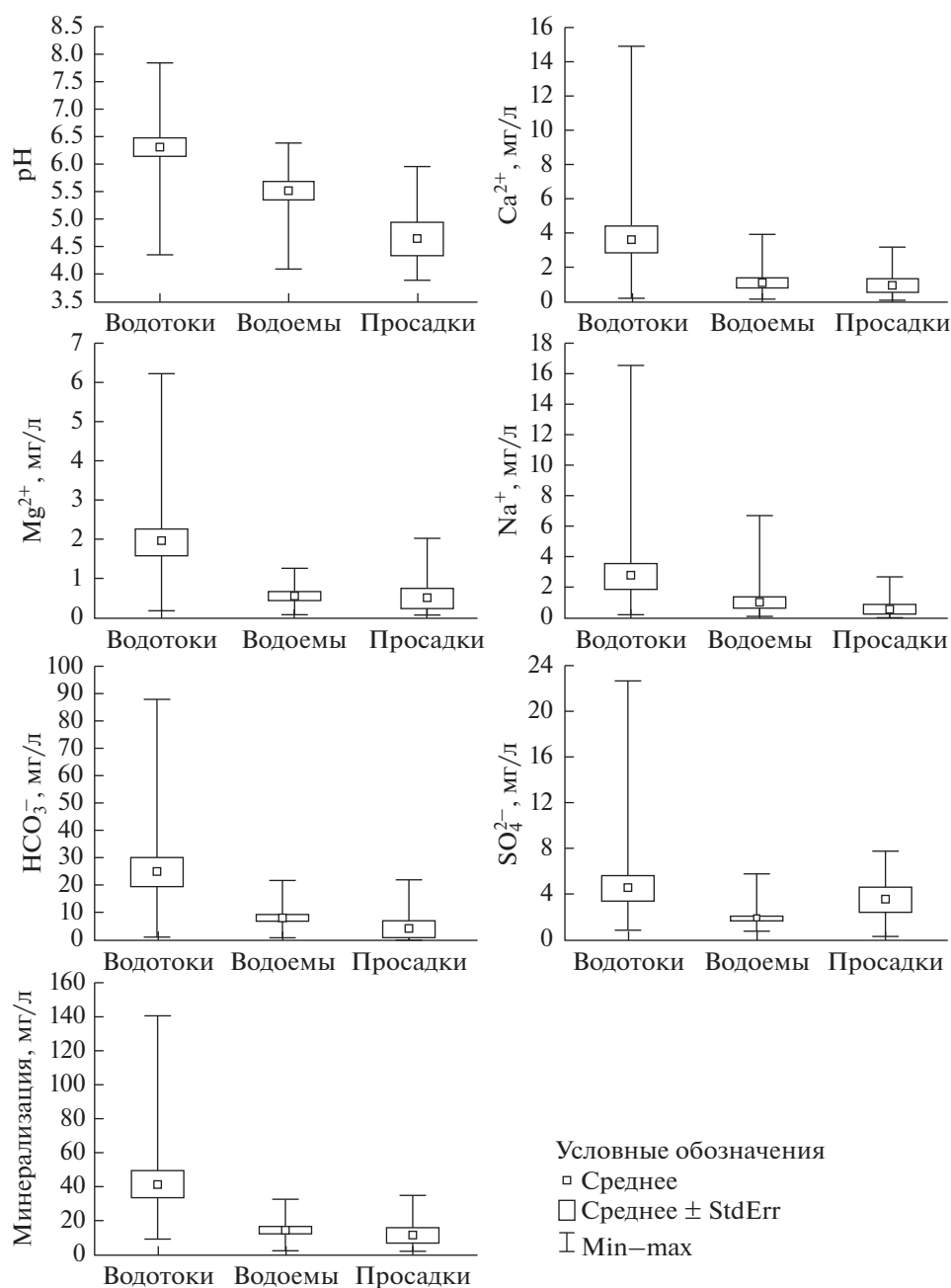


Рис. 2. Различия поверхностных водных объектов ЯНАО по основным показателям химического состава.

Таким образом, можно выделить основные отличительные признаки объектов друг от друга (рис. 4). Водотоки (ручьи и реки) отличаются от площадных объектов (озер и просадок) более широкими пределами значений pH (от кислых до слабощелочных), а также повышенной минерализацией. Дополнительные особенности характеризуют просадки: они отличаются от других объектов более кислыми значениями pH и повышенными значениями показателей, связанных с

наличием органического вещества: ХПК, ПОК и концентрациями $N-NH_4^+$ и PO_4 , что обусловлено особенностями их формирования.

Авторами также была рассмотрена вероятность существования значимых отличий в составе поверхностных вод различных речных бассейнов. В данном исследовании изученные объекты представляют 4 крупных речных бассейна – водосборные площади рр. Обь, Таз, Пур, Надым. С

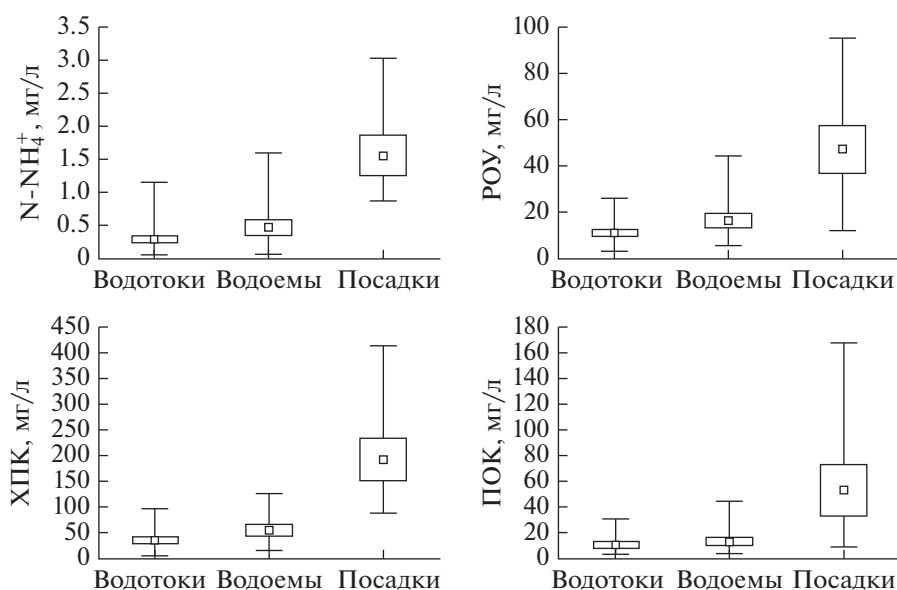


Рис. 3. Различия поверхностных водных объектов ЯНАО по показателям, отражающим содержание азота и углерода (условные обозначения см. на рис. 2).



Рис. 4. Структура классификационных характеристик поверхностных водных объектов ЯНАО.

помощью теста Краскела–Уоллеса было выявлено отсутствие статистически значимых отличий между физико-химическими показателями состава поверхностных вод в пределах четырех изученных бассейнов, за исключением концентраций Са.

Согласно критерию Кайзера (Kaiser, 1960), на формирование химического состава поверхностных водных объектов ЯНАО преимущественное влияние оказывают три фактора: собственные значения дисперсии первых трех факторов составляют 5.9; 2.4; 1.0 соответственно. В качестве

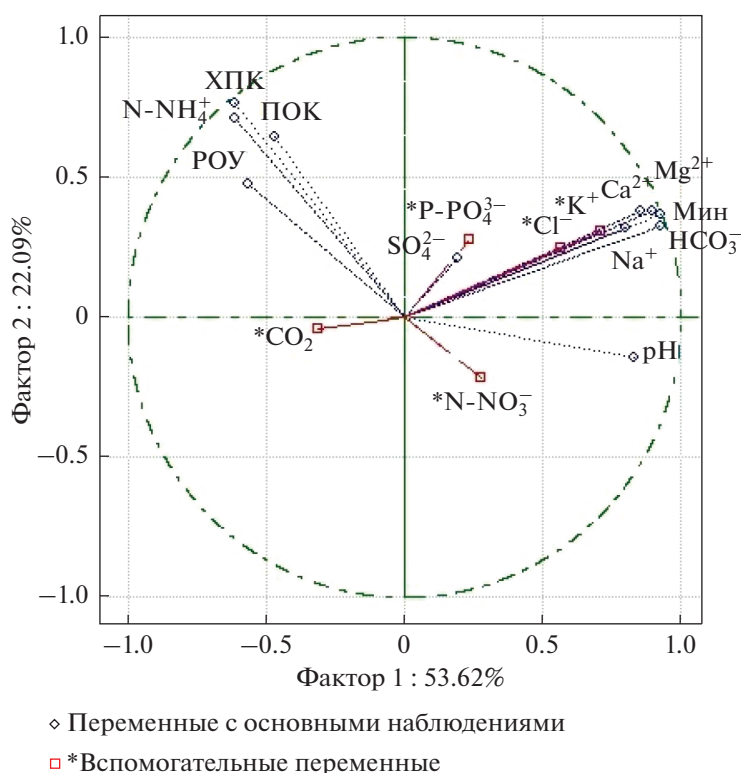


Рис. 5. Проекция переменных на факторное пространство (Фактор 1 vs Фактор 2).

переменных для анализа (с основными наблюдениями) в методе главных компонент (РСА) были выбраны показатели и компоненты химического состава, для которых выявлены статистически значимые отличия поведения между различными типами объектов (рН, HCO_3^- , SO_4^{2-} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , N-NH_4^+ , РОУ, ХПК, ПОК, минерализация). Остальные компоненты были заданы в качестве вспомогательных переменных. Анализ основывался на значениях всех наблюдений.

Трехфакторная модель объясняет 85.2% вариации исходных данных. Первый фактор положительно коррелирует с переменными, отражающими изменения общего химического состава вод (рН, HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , минерализация, и в меньшей степени с Cl^-), слабее проявляются отрицательная корреляция с N-NH_4^+ , РОУ и ХПК (рис. 5, табл. 3). На этот фактор приходится 53.6% объясненной дисперсии.

Максимальные факторные нагрузки второго фактора приходятся на показатели, отражающие содержание органического вещества (N-NH_4^+ , ХПК, ПОК) и, в меньшей степени, коррелируют с содержанием непосредственно РОУ. Второй фактор объясняет 22.1% дисперсии данных. Третий фактор объясняет только 9.5% вариации дан-

Таблица 3. Значения факторных нагрузок

Показатель	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
рН	0.830	-0.146	0.275
HCO_3^-	0.927	0.322	0.049
SO_4^{2-}	0.190	0.212	-0.856
Ca^{2+}	0.856	0.380	0.000
Mg^{2+}	0.896	0.381	0.007
Na^+	0.797	0.321	0.059
Минерализация	0.923	0.366	-0.067
N-NH_4^+	-0.615	0.711	0.038
РОУ	-0.564	0.475	-0.271
ХПК	-0.611	0.767	0.088
ПОК	-0.471	0.644	0.378
* CO_2	-0.315	-0.041	-0.001
* Cl^-	0.565	0.246	0.102
* K^+	0.709	0.306	-0.132
* N-NO_3^-	0.277	-0.213	0.057
* P-PO_4^-	0.233	0.278	0.119

* Дополнительные переменные.

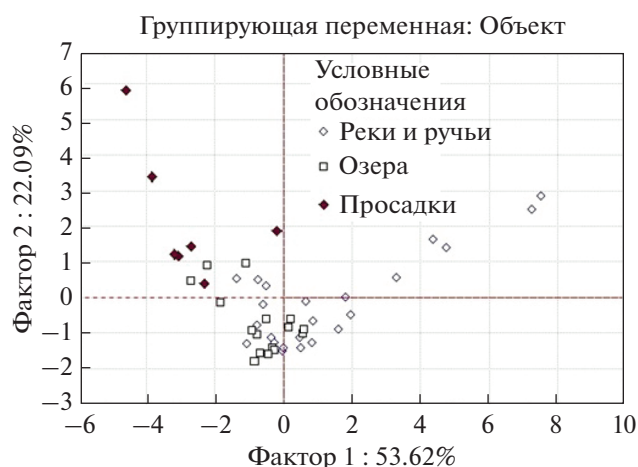


Рис. 6. Распределение факторных нагрузок для Факторов 1 и 2 с учетом типа водного объекта.

ных и связан с концентрацией SO_4^{2-} сильной отрицательной корреляцией (табл. 3).

При проектировании факторных нагрузок на пространство первого и второго факторов достаточно четко выделяются все три основных типа водных объектов – водотоки, озера и просадки (рис. 6). Также очевидно, что первый фактор в основном объясняет дисперсию данных по линейным объектам (рекам и ручьям), в то время как второй – по просадкам. Такое распределение нагрузок подтверждает выводы об обусловленности факторов. В частности, подтверждается вывод о том, что второй фактор связан с протаиванием органогенных горизонтов почв. Третий фактор, судя по распределению нагрузок, наиболее существенно влияет на водотоки и в меньшей степени на просадки, однако такой явной группировки объектов, как по первому и второму факторам, в данном случае не наблюдается.

Можно заключить, что первый фактор выражает влияние взаимодействия воды и минеральной составляющей подстилающих пород, а для водотоков, вероятно, и дальности переноса взвешенного материала. Также первый фактор в какой-то степени отражает состав атмосферных осадков, являющихся одним из основных источников питания водотоков и крупных поверхностных водоемов. Однако здесь следует отметить, что объекты были отобраны в период летне-осенней межени, когда роль атмосферных осадков как источника питания ограничена. Второй фактор связан с оттаиванием органогенных (торфяных) горизонтов почв. Наиболее вероятными причинами обособления третьего фактора могут являться специфические особенности состава пород, с которыми взаимодействуют изучаемые воды, а также процессы, связанные с жизнедеятельностью микроорганизмов. Влияние антропогенного фактора в

данном случае можно исключить, поскольку отсутствует корреляционная взаимосвязь сульфат иона с концентрациями хлорид-иона, связь же с концентрациями натрия на уровне с остальными основными катионами и анионами, имеющими природное происхождение. Дать более конкретное описание третьего фактора, влияющего на формирование химического состава исследуемых вод, на основе имеющихся данных затруднительно.

ВЫВОДЫ

На территории Ямало-Ненецкого автономного округа практически повсеместно распространены ультрапресные поверхностные воды, преимущественно со значениями рН, соответствующими нейтральной и слабокислой среде. В анионном составе преобладает гидрокарбонат ион, в катионном, главным образом, кальций и магний. Также высока доля иона аммония в химическом составе исследуемых вод. При этом концентрации аммонийного азота характеризуются сильной положительной корреляцией со значениями РОУ, ХПК и ПОК.

Водотоки ЯНАО (реки и ручьи) отличаются от водоемов (озер и просадок) более высокими значениями рН и концентрациями макрокомпонентов (HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+), что обусловлено в основном природными факторами, а именно взаимодействием с подстилающими породами и почвами. Среди водоемов просадки отличаются от озер более высокими концентрациями РОУ и значениями других показателей, связанных с поступлением органических веществ (N-NH_4^+ , ХПК, ПОК), что говорит о существенном влиянии оттаивания органогенных горизонтов почв на формирование их состава.

Статистический анализ показал, что основными факторами, влияющими на формирование состава изучаемых поверхностных водных объектов, являются взаимодействие воды с минеральной составляющей подстилающих пород и органическим веществом, поступающим из органогенных горизонтов почв. При этом первый фактор оказывает наибольшее влияние на водотоки, а второй на состав воды просадок. Повышенные же концентрации хлорид иона и натрия в некоторых точках опробования, вероятно, обусловлены антропогенным воздействием. О процессах и факторах, влияющих на поступление сульфат-иона в исследуемые воды на основе имеющихся данных, пока говорить затруднительно, однако наиболее вероятными причинами его повышенных концентраций являются специфические особенности состава пород, которые дренируют водотоки, и процессы, связанные с жизнедеятельностью микроорганизмов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 20-77-10084.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Тюменской области (1971) / отв. ред. Огороднов Е.А. Москва—Тюмень. Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР. 198 с.
- Воскресенский С.С. (1962) Геоморфология Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 352 с.
- Государственный доклад “О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Ямало-Ненецком автономном округе в 2020 г.” (2021). Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ямало-Ненецкому автономному округу. Салехард, 214 с.
- Караваева Н.А. (1982) Заболачивание и эволюция почв. М.: Академия наук СССР, 296 с.
- Лазуков Г.И. (1970) Антропоген северной половины Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 322 с.
- Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Дину М.И., Хорошавин В.Ю., Кремлева Т.А. (2017) Влияние природных и антропогенных факторов на процессы закисления вод в гумидных региона. *Геохимия*. (1), 41-56.
- Moiseenko T.I., Gashkina N.A., Dinu M.I., Khoroshavin V.Y., Kremleva T.A. (2017) Influence of natural and anthropogenic factors on water acidification in humid regions. *Geochemistry Int.* **55**(1), 84-97.
- Московченко Д.В. (2007) Эколого-геохимическое состояние водных объектов на территории заказника “Сургутский”. *Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения*. (7), 163-171.
- Московченко Д.В., Артамонова Г.Н., Бабушкин А.Г. (2008) Особенности формирования гидрохимических аномалий в районах нефтедобычи на севере Западной Сибири. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. (5), 411-419.
- Приказ от 13 декабря 2016 г. № 552 Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (с изменениями на 10 марта 2020 г.).
- Решетько М.В., Моисеева Ю.А. (2016) Климатические особенности и статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории севера Западной Сибири. *Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. **327**(4), 108-118.
- Савичев О.Г., Моисеева Ю.А. (2016) Устойчивость поверхностных вод тундры и лесотундры Западной Сибири к антропогенному влиянию. *Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Естественные науки*. **4**, 36-46.
- СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
- Сорокин Н.Д., Александров Д.Е. (2013) Микробиологическая трансформация углерода и азота в лесных почвах средней Сибири. *Вестник КрасГАУ*. **9**(84), 74-78.
- Сысо А.И. (2007) Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 277 с.
- Указ Президента РФ от 2 мая 2014 г. № 296 О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации.
- Feng X., Vonk J.E., Dongen B.E., Gustafsson Ö., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Wang Z., Montluçon D.B., Wacker L., Eglinton T.I. (2013) Differential mobilization of terrestrial carbon pools in Eurasian Arctic river basins. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **110**(35), 14168-14173.
- Grosse G., Jones B., Arp C. (2013) Thermokarst lakes, drainage, and drained basins. In *Treatise on Geomorphology* (Eds. Shroder J.F.). San Diego: Academic Press, P. 325-353.
- Holmes R.M., McClelland J.W., Peterson B.J., Tank S.E., Bulygina E., Eglinton T.I., Gordeev V.V., Gurtovaya T.Y., Raymond P.A., Repeta D.J., Staples R., Striegl R.G., Zhulidov A.V., Zimov S.A. (2012) Seasonal and annual fluxes of nutrients and organic matter from large rivers to the Arctic Ocean and surrounding seas. *Estuaries and Coasts*. **35**(2), 369-382.
- Ivanova I., Savichev O., Trifonov N., Kolubaeva Y.V., Volkova N. (2021) Major-ion chemistry and quality of water in rivers of northern West Siberia. *Water*. **13**, 3107. <https://doi.org/10.3390/w13213>
- Kaiser H.F. (1960) The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*. **20**(1), 141-151.
- Krickov I.V., Lim A.G., Manasypov R.M., Loiko S.V., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S., Shevchenko V.P., Dara O.M., Gordeev V.V. (2020) Major and trace elements in suspended matter of Western Siberian rivers: first assessment across permafrost zones and landscape parameters of watersheds. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **269**, 429-450.
- Li Z.G., Lin L., Sagisaka M., Yang P., Wu W.B. (2012) Global-scale modelling of potential changes in terrestrial nitrogen cycle from a growing nitrogen deposition. *Procedia Environmental Sciences*. **13**, 1057-1068.
- Lim A.G., Loiko S.V., Kuzmina D.M., Krickov I.V., Shirokova L.S., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S. (2021) Dispersed ground ice of permafrost peatlands: Potential unaccounted carbon, nutrient and metal sources. *Chemosphere*. **266**, 128953.
- Lim A., Loiko S., Kuzmina D., Krickov I., Shirokova L., Kulizhskiy S.P., Pokrovsky O. (2022) Organic carbon, major and trace elements reside in labile low-molecular form in the ground ice of permafrost peatlands: case study of col-loids in peat ice of western Siberia. *Environmental Science: Processes & Impacts*. Accepted Manuscript. <https://doi.org/10.1039/D1EM00547B>
- Manasypov R.M., Lim A.G., Krickov I.V., Shirokova L.S., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N., Pokrovsky O.S. (2020) Spatial and seasonal variations of C, nutrient, and metal concentration in Thermokarst lakes of Western Siberia across a permafrost gradient. *Water*. **12**(6), 1830.
- Manasypov R.M., Vorobyev S.N., Loiko S.V., Kritzov I.V., Shirokova L.S., Shevchenko V.P., Kirpotin S.N., Kulizhsky S.P., Kolesnichenko L.G., Zemtsov V.A., Sinkin V.V., Pokrovsky O.S. (2015) Seasonal dynamics of organic carbon and metals in thermokarst lakes from the discontinuous

- permafrost zone of Western Siberia. *Biogeosciences*. **12**(10), 3009-3028.
- Moiseenko T.I., Dinu M.I., Gashkina N.A., Kremleva T.A., Khoroshavin V.Y. (2020) Geochemical features of elements distributions in the lake waters of the arctic region. *Geochem. Int.* **58**(6), 613-623.
- Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S.V., Shirokova L.S., Krickov I.A., Pokrovsky B.G., Kolesnichenko L.G., Kopysov S.G., Zemtsov V.A., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. (2015) Permafrost coverage, watershed area and season control of dissolved carbon and major elements in Western Siberian rivers. *Biogeosciences*. **12**(21), 6301-6320.
- Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Kopysov S.G., Krickov I.V., Shirokova L.S., Loiko S.V., Lim A.G., Kolesnichenko L.G., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. (2020) Impact of permafrost thaw and climate warming on riverine export fluxes of carbon, nutrients and metals in Western Siberia. *Water*. **12**(6), 1817.
- Perminova I.V., Shirshin E.A., Zhrebker A., Pipko I.I., Pugach S.P., Dudarev O.V., Nikolaev E.N., Grigoryev A.S., Shakhova N., Semiletov I.P. (2019) Signatures of molecular unification and progressive oxidation unfold in dissolved organic matter of the Ob-Irtysh River system along Its path to the Arctic Ocean. *Scientific Reports*. **9**, 19487.
- Savichev O.G., Kolesnichenko L.G., Saifulina E.V. (2011) The ecologo-geochemical state of water bodies in the Taz-Yenisei interfluve. *Geogr. Nat. Resour.* **32**(4), 333-336.
- Savichev O.G., Mazurov A.K., Pipko I.I., Sergienko V.I., Semiletov I.P. (2016) Spatial patterns of the evolution of the chemical composition and discharge of river water in the Ob River Basin. *Dokl. Earth Sci.* **466**(1), 59-63.
- Shamilishvili G.A., Abakumov E.V., Pechkin A.S. (2016) Features of the soil cover of the Nadym district. YaNAO. *Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous region*. **4**(93), 12-16.
- Shiklomanov A., Déry S., Tretiakov M., Yang D., Magritsky D., Georgiadi A., Tang W. (2021) River freshwater flux to the Arctic Ocean. *Arctic Hydrology. Permafrost and Ecosystems*, 703-738.
- Stepanova V.A., Pokrovsky O.S., Viers J., Mironycheva-Tokareva N.P., Kosykh N.P., Vishnyakova E.K. (2015) Elemental composition of peat profiles in western Siberia: Effect of the micro-landscape. latitude position and permafrost coverage. *Applied Geochemistry*. **53**, 53-70.
- Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S., Serikova S., Manasypov R.M., Krickov I.V., Shirokova L.S., Lim A., Kolesnichenko L.G., Kirpotin S.N., Karlsson J. (2017) Permafrost boundary shift in Western Siberia may not modify dissolved nutrient concentrations in rivers. *Water*. **9**(12), 985.
- Wauthy M., Rautio M., Christoffersen K.S., Forsström L., Laurion I., Mariash H.L., Peura S., Vincent W.F. (2018) Increasing dominance of terrigenous organic matter in circumpolar freshwaters due to permafrost thaw. *Limnology and Oceanography Letters*. **3**(3), 186-198.
- Zhu X., Zhang W., Chen H., Mo J. (2015) Impacts of nitrogen deposition on soil nitrogen cycle in forest ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica*. **35**(3), 35-43.