

УДК 556.541

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД И НАНОСОВ В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ЛЕНЫ

*А.А. Четверова^{1,2}, И.В. Федорова^{2,1}, Л.А. Фролова³,
Г.Р. Нигаматзянова³, Т.В. Скороспехова², А.А. Шадрина¹*

¹*Санкт-Петербургский государственный университет,
г. Санкт-Петербург, 199034, Россия*

²*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
г. Санкт-Петербург, 199397, Россия*

³*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

Аннотация

Статья посвящена изучению качественных характеристик (химического состава вод и наносов, биологического разнообразия) стока реки Лены и особенностям преобразования (трансформации) этих характеристик в результате биогеохимических процессов, происходящих в дельтовой области. В статье даны гидрологическая, гидрохимическая, геохимическая (химический состав речных наносов) и гидробиологическая характеристики проток дельты на современном этапе.

На основе данных современных междисциплинарных исследований в дельте реки Лены показано, что в ее дельтовой области имеют место процессы, приводящие к формированию неоднородностей распределения химических веществ между раствором, взвесью и донными наносами.

Ключевые слова: дельта реки Лены, гидрология, гидрохимия, геохимия речных наносов, гидробиология, зоопланктон

Введение

Все имеющиеся сведения по дельте р. Лены можно разделить на два вида: стационарные многолетние исследования гидрологического режима реки, имеющиеся за период с 1935 по 2006 г. для замыкающего створа реки (г.п. Кюсюр), с 1951 по 2004 г. для Главного русла (4.7 км выше о. Столб) и Быковской протоки дельты р. Лены и с 1977 по 2004 г. для Оленекской и Туматской проток дельты; сезонные экспедиционные исследования, проводившиеся в рамках экспедиций Арктического и антарктического научно-исследовательского института (г. Санкт-Петербург) в отдельные годы, а также в рамках российско-германской экспедиции и проекта «НИС о. Самойловский», охватывающие временной промежуток с 2002 г. по настоящее время. Данные о гидрологическом состоянии нижнего течения р. Лены и ее дельты были получены в результате регулярных круглогодичных измерений на гидрометеорологических станциях Кюсюр (замыкающий створ реки) и ст. Хабарова (Столб/Сокол), расположенной в Быковской протоке дельты [1–4]. Сведения о распределении стока по основным рукавам дельты,

характеристики донных наносов в дельте и стока наносов были собраны в ходе сезонных экспедиционных исследований Арктического и антарктического научно-исследовательского института [5–7].

К современным литературным источникам, обобщающим мониторинговые гидрохимические наблюдения, можно отнести монографию «Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования» [8], где приведена подробная гидрохимическая характеристика р. Лены за многолетний период. Существует оценка гидрохимической обстановки, сделанная на основе многолетних данных (с 1980 по 2007 г.) Государственной службой наблюдения за состоянием окружающей природной среды, сотрудниками Института водных проблем Южного отделения РАН (г. Москва) и Гидрохимического института (г. Ростов-на-Дону), в которой подчеркнута значительное превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) по ряду загрязняющих веществ в устьевой области реки (от замыкающего створа п. Кюсюр до залива Неелова), максимальные значения которых обнаружены у постов Кюсюр и у ст. Хабарова [9].

В работах Рахольда и др. [10] и Гордеева [11] обобщены многолетние данные по стоку взвешенных наносов за весь период инструментальных наблюдений на р. Лене и ее крупных притоках (реки Алдан и Вилюй), а также приведены результаты дополнительных экспедиционных исследований взвешенных наносов за период открытой воды 1975–1981 гг.

Первые гидробиологические исследования дельты относятся к более раннему периоду, к началу XX в. (1901–1903 гг.), однако носят эпизодический характер [12]. Гидробиологические исследования в дельте р. Лены на современном этапе затрагивают в основном исследования многочисленных озер дельты [13–16]. Опубликованных данных о структурно-функциональных характеристиках зоопланктонных сообществ дельты р. Лены не вполне достаточно. К немногочисленным работам можно отнести работу Гукова [17], статью Краберг и др. [18], в которой дана характеристика фитопланктонных сообществ в дельте и в шельфовой зоне, а также подчеркнута влияние таяния многолетнемерзлых пород (ММП) водосбора дельты и гидрохимических особенностей вод р. Лены на фитопланктонные сообщества.

На текущем этапе изучение дельты р. Лены, проводимое в рамках ежегодной российско-германской экспедиции «Лена», имеет более разноплановый характер – затрагивает вопросы климатических изменений [1, 19–21], и все большую значимость и распространенность приобретают междисциплинарные исследования. Тем не менее большинство исследований по сей день направлено на изучение либо самой реки, либо шельфовых участков моря Лаптевых. Недостаточное внимание уделялось изучению качественных характеристик стока непосредственно самой дельтовой области – процессам, происходящим в протоках дельты. Высокая динамичность дельтовой области р. Лены, отмеченная в результатах ранее проведенных гидрологических, геоморфологических исследований, а также исследований режима ММП, создает предпосылки для изучения современного состояния объекта, так как данные многолетних мониторинговых наблюдений являются недостаточными для более глубокого понимания внутريدельтовых процессов.

1. Материалы и методы исследования

Гидрологические исследования, а также изучение качественных (гидрохимических, геохимических и гидробиологических) характеристик стока, результаты которых представлены в настоящей работе, выполнялись в летний период (июль – август) 2005, 2010–2014 гг. Все измерения и отборы проб на химический состав воды и речных наносов, а также пробы зоопланктона проводились на стандартных гидрологических створах Росгидромета.

Гидрологические измерения осуществлялись в соответствии с методами, принятыми для измерения расходов воды на постах и станциях гидрометсети.

В настоящей статье не будем подробно останавливаться на методах гидролого-геохимических исследований, обзор и описание которых, а также местоположение створов измерений приведены в статье И.В. Федоровой с соавторами [1]. В нашей статье внимание будет уделено лишь отдельным гидрологическим параметрам проток дельты, необходимых для выявления особенностей качественных характеристик стока. К таким параметрам относится показатель гидродинамических условий проток.

Для установления гидродинамических условий или бурности потока основных проток дельты по измеренным гидрологическим параметрам был рассчитан гидродинамический критерий подобия потоков – число Фруда (Fr) [22]. Для определения числа Фруда была использована следующая формула:

$$Fr = V^2 / (gH),$$

где V – средняя скорость течения в створе, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; H – средняя глубина в створе, м.

Отбор и обработка проб зоопланктона проводились в соответствии со стандартными методиками [23]. Количественные пробы зоопланктона отбирались процеживанием 100 л воды через малую сеть Апштейна (размер ячеек 100 мкм) с последующей фиксацией 4%-ным раствором формалина. Камеральная обработка проб зоопланктона включала определение видового состава зоопланктона, численности и биомассы. Для анализа структуры зоопланктона проток использовали индекс видового разнообразия Шеннона – Уивера (H) [24].

Полученных гидрохимических и геохимических данных оказалось достаточно для статистического анализа выборок с использованием статистического пакета IBM SPSS Statistic (версия 20.0.0), а также проведения факторного анализа с применением метода главных компонент, метода вращения «Варимакс» с нормализацией Кайзера. Степень применимости факторного анализа к данной выборке была оценена с помощью меры выборочной адекватности Кайзера – Мейера – Олкина.

Под процессами трансформации стока будем понимать преобразования качественных характеристик стока в дельте р. Лены в результате воздействия факторов окружающей среды (в том числе локальных факторов, типичных для дельтовой области), а также с участием биологического преобразования геохимических характеристик в результате вовлечения химических элементов в биологический круговорот веществ.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Гидрологические особенности проток дельты. Дельта р. Лены является крупнейшей дельтой в Российской Арктике. Началом дельты принято считать место разделения русла на два рукава: Главное русло и Булкурская протока, между которыми расположен первый остров дельты – остров Тит-Ары. Площадь дельты составляет около 30 000 тыс. км² [25]. Главное русло реки образует основные протоки дельты: Быковскую, Трофимовскую, Оленекскую, Туматскую и Булкурскую. Эти и более мелкие водотоки осуществляют продольное и поперечное рассредоточение речного стока ниже по течению, начиная от вершины дельты. В общей сложности в дельте р. Лены насчитывается более чем 800 проток.

Ранее было установлено, что основные протоки дельты р. Лены отличаются по водности, по гидродинамическим условиям, по характеристикам твердого стока, стока химических веществ и характеру донных отложений [1, 26]. Гидрологические характеристики основных проток дельты, измеренные в 2005, 2010–2013 гг., приведены в табл. 1. Более подробные сведения опубликованы также в электронной базе данных PANGAEA [27].

Из табл. 1 видно, что значения числа Фруда изменяются в достаточно широких пределах для одних и тех же проток в зависимости от водности года. Тем не менее удалось выявить некоторые закономерности. Наименьшие значения числа Фруда были зафиксированы для Булкурской протоки и Оленекской протоки в створе у д. Чай-Тумус. Характерными гидрологическими особенностями Булкурской протоки являются низкие значения расходов воды и низкие скорости течения по сравнению с остальными крупными протоками, а иногда и полное отсутствие стока в период летней межени (середина июля – август). Для створа Оленекской протоки у д. Чай-Тумус также отмечено низкое значение числа Фруда, что связано с резким увеличением глубин в створе по сравнению с соседними (выше и ниже по течению) участками протоки.

Самыми высокими значениями числа Фруда характеризуются Быковская протока и Оленекская протока в створе у р. Гусинки. В створе измерений на Быковской протоке зафиксированы наиболее высокие значения числа Фруда, превышающие значения данного критерия для створов основных магистралей дельты – Главного русла и Трофимовской протоки. Несмотря на большие скорости течения основных магистралей (> 1 м/с), максимальные значения критерия можно объяснить наличием и особенностями руслового разветвления в месте створа Быковской протоки, так как створ гидрологических измерений на Быковской протоке расположен после резкого поворота протоки с северного направления на восточное.

Створ Оленекской протоки у р. Гусинки также характеризуется высокой бурностью потока, что связано с большими скоростями течения в данном месте. Для Туматской протоки характерны малая водность, низкие скорости течения, малые глубины и, соответственно, низкие значения числа Фруда.

2.2 Физико-химическая характеристика вод и наносов дельты р. Лены.

Воды основных проток дельты в летний период (июль – август) относятся к водам очень малой и малой минерализации [28], их значения изменяются от 78 до 154 мг/л. Значения общей минерализации вод небольших проток дельты

Табл. 1

Диапазон гидрологических характеристик основных протоков дельты р. Лены в летний период (июль – август) 2005, 2010–2013 гг.

Название протоки, створ	F , м ²	Q , м ³ /с	V , м/с	$Fr \cdot 10^4$
Булкурская, перед впадением в Оленекскую протоку	2010–5153	0*–1377	0–0.27	0.2–16
Быковская, гидроствор	6107–8862	2948–7634	0.48–0.99	53–176
Главное русло, гидроствор	33993–37198	23776–47803	0.69–1.32	24–82
Трофимовская, гидроствор	12657–31741	8494–27124	0.64–0.86	50–78
Оленекская, гидроствор	2893–5061	1143–3241	0.38–0.64	27–93
Оленекская, у д. Чай-Гумус	5914–7748	1131–3242	0.17–0.42	2–15
Оленекская, у р. Гусинки	2500–5908	1071–6071	0.35–1.03	24–137
Туматская, гидроствор	4316–7219	610–3920	0.13–0.54	3–29

Примечание: F – площадь поперечного сечения русла, Q – измеренный расход воды, V – средняя скорость течения в створе, Fr – число Фруда, * сток в протоке отсутствовал 25.08.2012.

и водотоков водосборной территории могут превышать 200 мг/л. Наиболее минерализованными среди водных объектов дельты являются талые воды ручьев, стекающих с ледового комплекса, с покровных массивов, главным образом, позднеплейстоценовых супесчано-суглинистых отложений, пронизанных мощными ледяными жилами [29], значения общей минерализации которых изменяются в широких пределах и могут достигать 570 мг/л. По соотношению главных ионов большинство вод дельты относится к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе, второму типу вод ($С_{Ca}^{II}$) по классификации О.А. Алекина [28]. Талые воды ледового комплекса относятся к водам гидрокарбонатного класса, кальциевой группы, третьего типа ($С_{Ca}^{III}$) по классификации Алекина. Такими особенностями характеризуются метаморфизированные воды, подвергшиеся катионному обмену ионов Na на ионы Ca и Mg [28].

Воды проток дельты характеризуются нейтральными или слабощелочными значениями показателя pH (6.9–7.9). Талые воды ледового комплекса характеризуются значениями pH в более широком диапазоне от слабокислых до слабощелочных (5.7–8.0).

Высокие значения растворенного кислорода (> 100% насыщения) являются характерными для вод проток дельты и возникают в результате высокой турбулентности вод, а также из-за преобладания сильных ветров большую часть летнего периода, что создает условия для хорошего перемешивания водных масс.

Отличительной особенностью вод дельты р. Лены являются повышенные значения концентраций растворенного кремния (1.1–2.7 мг/л) и растворенного железа (0.01–0.07 мг/л), малые содержания микроэлементов, в основном находящиеся ниже пределов их обнаружения используемыми методами. Отмечено низкое содержание окисленных форм азота (2.6–34.7 мкг/л нитратов и 3.3–11.1 мкг/л нитритов). Концентрации фосфатов изменяются в пределах 3.1–26.2 мкг/л.

По химическим характеристикам речных наносов (взвешенных и донных) дельта р. Лены характеризуется кремнистыми наносами (Si/Al от 4.2 до 18).

Полученные содержания основных петрогенных элементов (Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , K_2O , MgO , Na_2O , SiO_2), а также микроэлементов (Li , Ba , Pb , Sr , Ni , V) хорошо согласуются с данными предыдущих исследований [26–28, 30].

Для выявления разнообразия геохимических условий в пределах дельтовой области был применен статистический анализ значений полученных характеристик.

Отличительной особенностью вод проток дельты р. Лены являются относительно высокие значениями температуры воды в летний период: они изменялись в пределах от 10.2 °С до 18.9 °С. Было отмечено, что температура воды в пределах дельтовой области зависит от величины стока. Так, наиболее низкие температуры воды были зафиксированы в Оленекской и Булкурской протоках, а также в небольших протоках центральной части дельты, где наиболее заметно влияние вод, поступающих в протоки в результате сезонного таяния ММП водосборной территории. Температура вод временных водотоков, стекающих с ледового комплекса, имеет еще более низкие значения и изменяется во время летнего сезона (июль – август) в пределах от 0.8 °С до 11.5 °С.

Влияние региональных факторов на формирование особенностей стока в дельте выражается также в повышении концентрации некоторых биогенных компонентов, например растворенных силикатов, фосфатов, нитратов и нитритов (рис. 1).

Концентрации биогенных элементов в талых водах ММП ледового комплекса характеризуются наличием значительных выбросов концентраций силикатов, фосфатов, окисленных форм азота (нитратов и нитритов), а также наибольшим диапазоном концентраций по сравнению с таковыми для проток дельты. Данный факт может говорить о потенциальном источнике поступления в водные объекты представленных соединений в результате деградации ММП ледового комплекса, имеющего широкое распространение в дельте [20]. Подтверждением этому факту могут служить более высокие медианные значения для выборок гидрохимических данных и больший разброс значений для небольших проток, Булкурской протоки, характеризующейся незначительным стоком или его отсутствием в летний период, Туматской протоки, характеризующейся небольшой водностью и бурностью потока, и Оленекской протоки, подверженной влиянию талых вод с ледового комплекса.

2.3. Гидробиологическая характеристика стока. Зоопланктон. Динамичность гидрологического режима проток дельты, и экстремальность природных условий региона исследования неблагоприятно сказывается на формировании гидробиологических характеристик стока в дельте [17]. Тем не менее в результате исследований, проведенных в 2013 и 2014 гг., выявлены некоторые различия в особенностях формирования зоопланктона.

В общей сложности в составе зоопланктона проток дельты р. Лены обнаружено 34 таксона зоопланктонных организмов в 2013 г. и 43 таксона в 2014 г. Как и в ранее опубликованных работах [31], наибольшее видовое разнообразие зоопланктона составляли виды типа Rotifera: 48.7% от общего числа видов за 2013 г. и 59.0% – за 2014 г. Видовое разнообразие среди низших ракообразных меньше, обнаружено в общей сложности всего 12 видов Cladocera (27.0% от общего числа

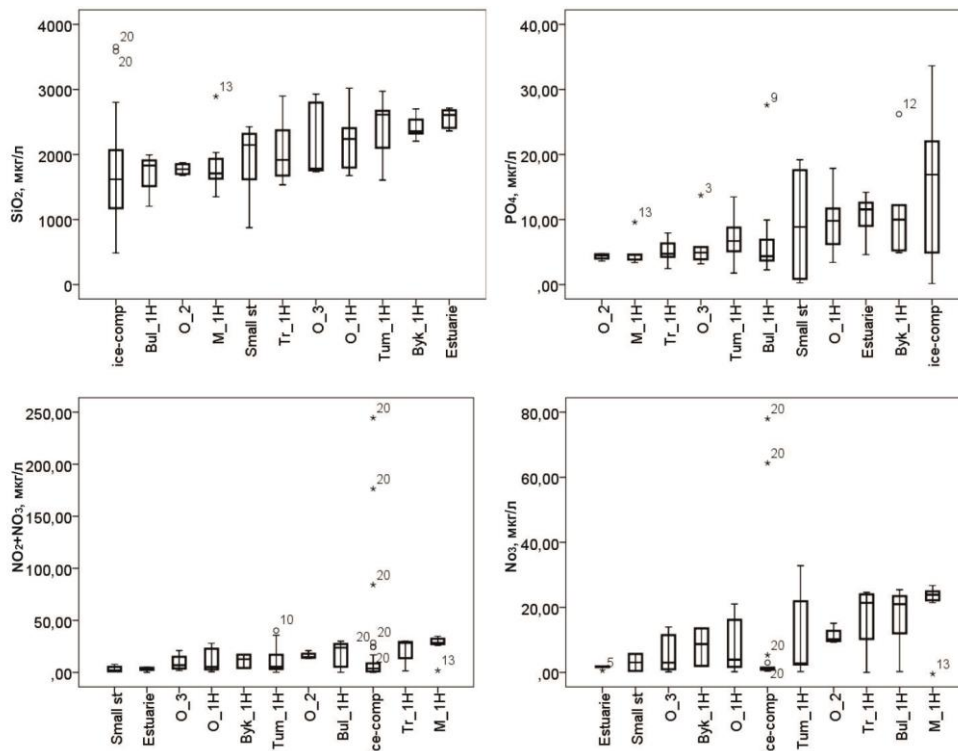


Рис. 1. Диаграмма разброса значений биогенных элементов в водных объектах дельты р. Лены (2010–2014 гг.). Обозначения: ice complex – талые воды с ледового комплекса, Small streams – небольшие протоки дельты, Byk_1H – Быковская протока (гидроствор), Bul_1H – Булкурская протока, Tum_1H – Туматская протока (гидроствор), M_1H – Главное русло (гидроствор), O_1H – Оленекская протока (гидроствор), O_2 – Оленекская протока, Чай-Тумус, O_3 – Оленекская протока, Гусинка, Tr_1H – Трофимовская протока (гидроствор)

видов в 2013 г. и 23.1% – в 2014 г.) и 14 видов Copepoda (24.3% видового разнообразия за 2013 г. и 17.9% – в 2014 г.). По частоте встречаемости преобладают коловратки, а именно *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1987) и *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851). Эти два вида коловраток относятся к постоянному комплексу зоопланктона в водах устьевое участка р. Лены [13]. Кроме того, во всех пробах 2014 г. отмечались ювенильные стадии развития веслоногих ракообразных.

Средняя биомасса зоопланктона проток за период исследований в 2013 г. составила 57.25 ± 10.7 мг/м³, изменяясь значительно от 9.6 мг/м³ в Главном русле реки до 175.9 мг/м³ в Булкурской протоке, что объясняется особенностями гидрологического режима проток дельты, которые во многом определяют довольно значительные различия в количественных показателях [17]. Так, например, значения биомассы зоопланктона в Оленекской протоке в образцах, отобранных в июле – августе 2001 г., составляют в среднем 0.2 г/м³ [32]. Большую часть биомассы составляют представители группы Cladocera (30.9 ± 8.4 мг/м³), на долю веслоногих ракообразных и коловраток приходится 24.2 ± 5.4 и 2.2 ± 0.08 мг/м³ соответственно. Наибольший вклад в биомассу вносили виды рода *Bosmina*, в большей степени *Bosmina (Eubosmina) coregoni* (Baird, 1857)

(19.7 ± 4.2 мг/м³). Из веслоногих ракообразных весомый вклад в биомассе имел *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857) – 20.2 ± 4.4 мг/м³. В отличие от результатов гидробиологических исследований за 2013 г., в образцах с проток в 2014 г. биомасса определялась группами зоопланктона более или менее в равной степени и равнялась в среднем 65.2 ± 15.5 мг/м³. Высокие показатели биомассы отмечены для ракообразных *M. leuckarti* (10.7 ± 2.6 мг/м³) и *Bosmina longirostris* (Muller, 1785) (7.9 ± 2.9 мг/м³).

Отмечено также, что по встречаемости и показателям биомассы зоопланктона за 2013 г. выделялись Булкурская и Туматская протоки (в среднем по протокам 87.4 и 113 мг/м³ соответственно), где зафиксированы наибольшие показатели биомассы зоопланктона. В пробах 2013 г. и весенних пробах 2014 г. минимальные показатели биомассы зоопланктона отмечены в Главном русле р. Лены (32.1 мг/м³ в 2013 г. и 65.7 мг/м³ в 2014 г.). Наиболее высокие показатели встречаемости видов, составляющих постоянный комплекс зоопланктона в водах дельты, отмечены в Булкурской и Трофимовской протоках, меньше – в Туматской протоке; наиболее бедно представлен данный комплекс в Главном русле реки. Таким образом, более высокие скорости течения на Главном русле в сравнении со скоростями течения в рукавах дельты, а также более высокие значения мутности воды существенным образом влияют на гидробиологическую обстановку проток [33]

2.4. Выявление особенностей биогеохимической трансформации стока в дельте. Биогеохимическая трансформация стока была исследована с помощью факторного анализа данных о химических характеристиках воды, взвеси и донных наносов. Использование геохимических индексов также способствовало объяснению процессов, приводящих к трансформации стока.

Так, например, значение соотношения концентраций Fe₂O₃ к MnO (рис. 2, а) во взвешенных и донных наносах в дельте, используемого в геохимии как индикатор окислительно-восстановительной среды, показало, что наиболее окислительные условия характерны для Туматской и Быковской проток дельты, Главного русла реки и Оленекской протоки у д. Чай-Тумус, где по сравнению с остальными протоками создаются особые условия для накопления железа и марганца в донных отложениях. В данной группе проток (выделены на рис. 2) отмечено также накопление фосфатов в донных отложениях (рис. 2, б).

На основе факторного анализа минеральных компонентов трех выборок (растворенных химических веществ, химических компонентов взвеси и донных наносов) было выделено несколько факторов, влияющих на формирование геохимического стока в дельте р. Лены и на его трансформацию.

Например, для стока растворенных веществ и его преобразования в дельте было выделено четыре основных фактора, описывающих 82.6% от общей дисперсии выборки, а для стока взвешенных веществ – три основных фактора (79.5% от общей дисперсии), для донных наносов два основных фактора (87.3% от общей дисперсии).

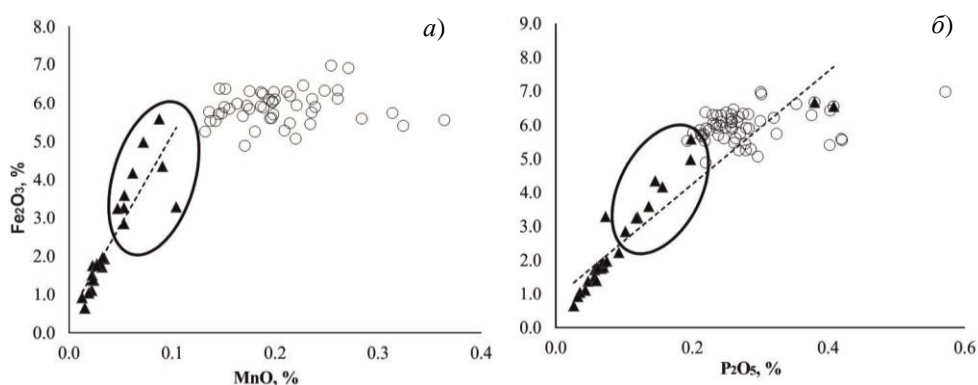


Рис. 2. Соотношения геохимических компонентов $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO}$ (а), $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ (б) во взвешенных (кружки) и донных (треугольники) наносах в дельте р. Лены. На рисунке обведена группа проток, характеризующихся особыми условиями накопления химических элементов в донных отложениях

Для дальнейшей интерпретации результатов факторного анализа следует отметить, что наиболее значимым фактором, описывающим наибольший процент от общей дисперсии, является фактор 1. Значимость фактора уменьшается с возрастанием его номера.

Установленные факторы были описаны на основе знания специфики химических процессов, происходящих в водных системах и приводящих к перераспределению веществ между раствором, взвешенными и донными наносами.

Основным источником поступления химических компонентов являются породы исследуемой территории, главными компонентами которых являются восемь основных петрогенных соединений – Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , MgO , MnO , TiO_2 , P_2O_5 , SiO_2 , которые и составляют основу речных наносов р. Лены, а также находятся в сильной корреляции (величины корреляции составляют 0.754 и выше) с фактором 1 («литогенным» фактором), описывающим наибольший процент от общей дисперсии как для взвеси, так и для донных наносов.

Хорошая зависимость фактора 2 («криогенного» фактора) для взвеси от таких компонентов, как CaO , Sr , характеризует привнос этих соединений в результате процессов вымораживания (величины корреляции -0.866 и -0.661 соответственно). Корреляция фактора 3 («биогеохимического» фактора) с соединениями K_2O , MnO , P_2O_5 является отражением биогеохимических процессов, объяснение которым будет дано ниже.

Для донных же наносов выделен еще один фактор – фактор 2, или «гидродинамический», зависящий от содержания (накопления) соединений Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , которые являются основными компонентами илистой фракции. Накопление илистой фракции происходит в результате изменения гидродинамических условий на отдельных участках дельты или участках ее проток в результате снижения скоростей течения.

Наиболее динамичной средой среди описанных является водная среда, этим объясняется наибольшее количество выявленных факторов для гидрохимических характеристик вод дельты.

Так, Ba, Ca, Mg, Sr, содержание которых находится в сильной корреляции от фактора 1 (величины корреляции 0.826 и выше), являются легкорастворимыми водными мигрантами и отражают особенности водосборной территории.

Наличие сильной связи фактора 2 с ионами SO_4 и Cl (величины корреляции 0.862 и 0.916 соответственно) отражает влияние криогенного фактора, а также ледового комплекса на формирование химического состава вод дельты. Высокие концентрации этих ионов в химическом составе вод зафиксированы в талых водах, стекающих с ледового комплекса. Как менее значимые проявились еще два фактора, отражающие зависимость от ионов Al, Si и K, что, вероятно, также характеризует особенности водосборной территории (поступление элементов с заболоченных территорий – фактор 3 «болотное влияние») и процессы криогенного выветривания.

Отдельное внимание стоит уделить интерпретации фактора 4 («биогеохимического»), описывающего 14% от общей дисперсии выборки взвешенных наносов, а также входящего в состав фактора 1 для донных наносов (69.3% от общей дисперсии). Данный фактор, по нашему мнению, хорошо отражает специфику биогеохимической трансформации стока в дельте. Рассматриваемый фактор находится в прямой корреляции с содержанием оксида калия и в обратной корреляции с оксидами марганца и фосфора. Перечисленные компоненты являются важнейшими элементами для существования фито- и зоопланктонных сообществ, которые из раствора потребляются фитопланктоном, а затем и зоопланктоном. Наиболее активно из раствора поглощаются калий и фосфор. Калий входит в состав жидкостей, фосфор – в состав энергетических молекул аденозинтрифосфата, присутствующих в любых живых организмах, марганец является одним из компонентов хлорофилла. При отмирании планктона, являющегося компонентом взвеси, что и зафиксировано интерпретируемым фактором, вышеуказанные элементы накапливаются в донных наносах, что приводит к процессам биогеохимической трансформации стока в дельте р. Лены. Разнонаправленность корреляционной связи данного фактора с рассматриваемыми компонентами может объясняться хорошей растворимостью калия и быстрым его переходом из донных отложений снова в раствор, в отличие от марганца и фосфора, накапливающихся в донных отложениях.

Заключение

В результате проведенного исследования были выявлены основные факторы, оказывающие влияние на формирования качественных характеристик стока в дельте р. Лены.

Геохимические особенности стока в дельте, а также характер перераспределения химических элементов в системе «вода – взвесь – донные наносы» зависят от нескольких факторов: влияния водосборной территории, гидродинамических условий проток, криогенных процессов, деградации ММП и биогеохимических трансформаций (преобразований). Важнейшими факторами, влияющими на формирование биологических компонентов стока, являются гидродинамические условия проток (скорость течения, бурность потока), а также содержание биогенных элементов.

На данный момент остаются малоизученными в отношении биогеохимических процессов устьевые области проток дельты, характеризующиеся особыми гидродинамическими и аккумулятивными процессами. Более подробные гидролого-геохимические и гидробиологические исследования, включая данные о фито- и зоопланктонных характеристиках водных объектов, помогут в дальнейшем подтвердить сделанные первоначальные выводы и углубить знания о процессах трансформации стока в дельтовых областях.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проекты 15-35-50566 мол_нр, 15-05-04442 А и 14-05-00787 А), а также за счет программы повышения конкурентоспособности Казанского (Приволжского) федерального университета и «Мероприятия б» Санкт-Петербургского государственного университета.

Литература

1. Fedorova I., Chetverova A., Bolshiyarov D., Makarov A., Boike J., Heim B., Morgenstern A., Overduin P., Wegner C., Kashina V., Eulenburg A., Dobrotina E., Sidorina I. Lena Delta hydrology and geochemistry: long-term hydrological data and recent field observations // *Biogeosciences*. – 2015. – V. 12. – P. 345–363. – doi: 10.5194/bg-12-345-2015.
2. Ежегодные данные о качестве поверхностных вод по территории деятельности Омского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды за 1989–1992 гг. – Т. 6, Вып. 4–9.
3. Гидрологические ежегодники (бассейн моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского). – Л.: Гидрометеиздат, 1960–1974. – Т. 8, Вып. 0–7.
4. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек. 2002–2006 гг. – Якутск, 2010. – Ч. 2, Т. 5–6. – 110 с.
5. Иванов В.В. Сток и течения основных протоков дельты р. Лены // Труды Арктического науч.-исслед. ин-та. Гидрология рек Советской Арктики. – Л.: Морской транспорт, 1963. – Т. 234, Вып. 5. – С.76–86.
6. Иванов В.В. О стоке взвешенных и влекомых наносов основных протоков дельты р. Лены // Проблемы Арктики и Антарктики. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – Вып. 18. – С. 31–40.
7. Иванов В.В., Пискун А.А., Корабель Р.А. Распределение стока по основным рукавам дельты Лены // Труды ордена Ленина Арктического науч.-исслед. ин-та. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – Т. 387. – С. 59–71.
8. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / Под ред. Н.И. Алексеевского. - М.: ГЕОС, 2007. – 585 с.
9. Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. Anthropogenic transformation of aquatic environment composition in the Lena river mouth area // *Water Resour.* – 2011. – V. 38, No 2. – P. 187–198. – doi: 10.1134/S0097807811020126.
10. Rachold V., Alabyan A., Hubberten H.-W., Korotaev V.N., Zaitsev A.A. Sediment transport to the Laptev Sea – hydrology and geochemistry of the Lena River // *Polar Res.* – 1996. – V. 15, No 2. – P. 183–196. – doi: 10.1111/j.1751-8369.1996.tb00468.x.
11. Гордеев В.В., Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Жулидов А.В., Брызгалов В.А. Оценка выноса биогенных элементов с речным и подземным стоком в окраинные моря Российской Арктики // *Водные ресурсы*. – 1999. – Т. 26, № 2. – С. 206–211.

12. Вишнякова И.И., Абрамова Е.Н. Организация зоопланктонных сообществ полигональных озер южной части дельты р. Лены // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. – М., 2009. – С. 265–277.
13. Abramova E., Vishnyakova I. New data about zooplankton species composition and distribution in the lakes of the Lena Delta // Ber. Polar Meerforsch. Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA: The Expedition LENA 2008 / Ed. by D. Wagner, P. Overduin, M.N. Grigoriev, Ch. Knoblauch, D.Yu. Bolshiyakov. – 2012. – V. 642. – P. 30–35.
14. Abramova E., Vishnyakova I., Torsten S. Hydrobiological investigations in the Lena Delta // Ber. Polar Meerforsch. Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA: The Expedition LENA 2006 / Ed. by Ju. Boike, D.Yu. Bolshiyakov, M.N. Grigoriev. – 2007. – V. 566. – P. 6–8.
15. Nigamatzyanova G., Frolova L. Zooplankton communities of the Lena River delta (Siberia, Russia) // 16th Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016. – 2016. – Book 5, V. 2. – P. 643–650. – doi: 10.5593/SGEM2016/B52/S20.083.
16. Nigamatzyanova G., Frolova L., Abramova E. Zooplankton spatial distribution in thermokarst lake of the Lena river delta (Republic of Sakha (Yakutia)) // Res. J. Pharm., Biol. Chem. Sci. – 2016. – V. 7, No 5. – P. 1288–1297.
17. Гуков А.Ю. Гидробиология устьевой области реки Лены. – М.: Науч. мир, 2001. – 288 с.
18. Kraberg A.C., Druzhkova E., Heim B., Loeder M.J.G., Wiltshire K.H. Phytoplankton community structure in the Lena Delta (Siberia, Russia) in relation to hydrography // Biogeosciences. – 2013. – V. 10. – P. 7263–7277. – doi: 10.5194/bg-10-7263-2013.
19. Boike J., Kattenstroth B., Abramova K., Bornemann N., Chetverova A., Fedorova I., Fröb K., Grigoriev M., Grüber M., Kutzbach L., Langer M., Minke M., Muster S., Piel K., Pfeiffer E.-M., Stoof G., Westermann S., Wischniewski K., Wille C., Hubberten H.-W. Baseline characteristics of climate, permafrost, and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011) // Biogeosciences. – 2013. – V. 10, No 3. – P. 2105–2128. – doi: 10.5194/bg-10-2105-2013.
20. Morgenstern A., Ulrich M., Günther F., Roessler S., Fedorova I., Rudaya N., Wetterich S., Boike J., Schirrmeister L. Evolution of thermokarst in East Siberian ice rich permafrost: A case study // Geomorphology. – 2012. – V. 201. – P. 363–379.
21. Morgenstern A., Röhr C., Grosse G., Grigoriev M. The Lena River Delta – inventory of lakes and geomorphological terraces. – Alfred Wegener Institute: Research Unit Potsdam, 2011. – doi: 10.1594/PANGAEA.758728.
22. Гришакин К.В. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 311 с.
23. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресных водоемах. Зоопланктон и его продукция / Под науч. ред. Г.Г. Винберг, Г.М. Лаврентьева. – Л.: ГосНИОРХ, ЗИН АН СССР, 1982. – 33 с.
24. Shannon C.E., Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. – Urbana: Univ. Ill. Press, 1963. – 117 p.
25. Большиakov Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. Происхождение и развитие дельты реки Лены. – СПб.: ААНИИ, 2013. – 268 с.
26. Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Кукулина Л.В., Четверова А.А. Структура водотоков в дельте Лены и ее влияние на процессы трансформации речного стока // География и природные ресурсы. – 2014. – № 1. – С. 91–99.

27. *Fedorova I., Bolshiyakov D.Yu., Chetverova A., Makarov A., Tretiyakov M.* Measured water discharges, suspended supply and morphometric parameters of cross-sections in the Lena River Delta during summer period 2002–2013 // PANGAEA. – 2013. – doi: 10.1594/PANGAEA.808854.
28. *Алёкин О.А.* Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 413 с.
29. *Григорьев М.Н., Куницкий В.В.* Ледовый комплекс арктического побережья Якутии как источник наносов на шельфе // Гидрометеорологические и биогеохимические исследования в Арктике: Труды Арктического регионального центра. – Владивосток: ДВО РАН, 2000. – Т. 2, Ч. 1. – С. 109–116.
30. *Савенко В.С.* Химический состав взвешенных наносов рек мира. – М.: ГЕОС, 2006. – 174 с.
31. *Гордеев В.В.* Микроэлементы в воде, взвеси и донных осадках Обской губы, Енисейского залива и дельты Лены и прилегающих областей Карского моря и моря Лаптевых // Современное гидрологическое состояние дельты р. Лены. Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. – М.: Моск. гос. ун-т, 2009. – С. 202–224.
32. *Abramova E.N., Sofronov Yu.N., Abramson N.* Biological research in the Lena Delta // Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV-SEA 2000: The Expedition LENA 2001 / Eds. E.-M. Pfeiffer, N. Grigoriev. – 2002. – P. 42–43.
33. *Нигаматзянова Г.Р., Фролова Л.А., Четверова А.А., Федорова И.В.* Гидробиологические исследования проток устьевой области реки Лены // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2015. – Т. 157, кн. 4. – С. 96–108.

Поступила в редакцию
18.01.17

Четверова Антонина Александровна, ассистент кафедры гидрологии суши, научный сотрудник лаборатории полярных и морских исследований

Санкт-Петербургский государственный университет
Университетская наб., д. 7/9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
ул. Беринга, д. 38, г. Санкт-Петербург, 199397, Россия
E-mail: a.chetverova@gmail.com

Федорова Ирина Викторовна, кандидат географических наук, заведующий лабораторией полярных и морских исследований; доцент кафедры гидрологии суши

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
ул. Беринга, д. 38, г. Санкт-Петербург, 199397, Россия
Санкт-Петербургский государственный университет
Университетская наб., д. 7/9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: ifedorova@otto.nw.ru

Фролова Лариса Александровна, кандидат биологических наук, доцент кафедры зоологии и общей биологии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: Larissa.Frolova@kpfu.ru

Нигаматзянова Гульнара Ришатовна, аспирант Института фундаментальной медицины и биологии, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Палеоклиматологии, палеоэкологии и палеомагнетизма»

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: Gulnaraniga@mail.ru

Скороспехова Татьяна Викторовна, ведущий инженер отдела географии полярных стран

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

ул. Беринга, д. 38, г. Санкт-Петербург, 199397, Россия

E-mail: *Tanchiz@gmail.com*

Шадрина Александра Анатольевна, магистрант Института наук о Земле

Санкт-Петербургский государственный университет

Университетская наб., д. 7/9, г. Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: *Chilly.che@gmail.com*

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2017, vol. 159, no. 1, pp. 122–138

On the Specifics of Formation of the Qualitative Characteristics of Waters and Sediments in the Lena River Delta

A.A. °Chetverova^{a,b}, I.V. °Fedorova^{b,a**}, L.A. °Frolova^{c***}, G.R. Nigamatzyanova^{c****},
T.V. Skorospekhova^{b*****}, A.A. °Shadrina^{a*****}*

^a*St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia*

^b*Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, 199397 Russia*

^c*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

E-mail: * *a.chetverova@gmail.com*, ** *ifedorova@otto.nw.ru*, *** *Larissa.Frolova@kpfu.ru*,
**** *Gulnaraniqa@mail.ru*, ***** *Tanchiz@gmail.com*, ***** *chilly.che@gmail.com*

Received January 18, 2017

Abstract

The paper considers the qualitative characteristics (chemical composition of waters and sediments, biological diversity) of the Lena runoff and their transformation as a result of the biogeochemical processes taking place in the delta region. The hydrological, hydrochemical, geochemical (chemical composition of river sediments), and hydrobiological description of the delta branches at the current stage has been provided.

The Lena delta branches are characterized by a wide variety of water discharge values and hydrodynamic conditions.

It has been revealed that the hydrochemical composition of the delta is specific due to the dominance of hydrocarbonates and calcium ions, pH 6.9–7.9, high oxygen saturation conditions (more than 100 % sat.) throughout the water column because of wind activity, high concentrations of dissolved silica (1.1–2.7 mg/L) and iron (0.01–0.07 mg/L) if compared to the world's mean values in natural freshwater bodies, and low concentrations of trace elements (mainly below the detection limits). The concentrations of nitrates and phosphates have been estimated in the range of 2.6–34.7 µg/L and 3.1–26.2 µg/L, respectively. The bottom and suspended sediments have been assigned to the siliceous type (Si/Al varies from 4.2 to 18 µg/L).

The results of the analysis of hydrodynamic conditions, hydrobiological features, geochemical indices, as well as data of the statistical factor analysis, have shown chemical elements redistribution dependencies. Several factors determining the chemical composition of water and sediments in the Lena River delta have been distinguished. The interpretation of these factors reflects the influence of river catchment area, cryogenic processes in the river delta, and biogeochemical processes.

Based on the modern multidisciplinary research performed in the Lena delta, it has been demonstrated that processes leading to an inhomogeneous distribution of chemical elements between water (dissolved fraction), suspended matter, and bottom sediments occur in the delta of the river.

Keywords: Lena River delta, hydrology, hydrochemistry, geochemistry of river sediments, hydrobiology, zooplankton

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Foundation for basic Research (projects nos. 15-35-50566 mol_nr, 15-05-04442 A, and 14-05-00787 A), as well as by the program for increasing the competitiveness of Kazan Federal University and the “Campaign 6” of St. Petersburg State University.

Figure Captions

Fig. 1. The diagram showing the range of concentrations of biogenic elements in the water objects of the Lena River delta (2010–2014). Designations: ice complex – meltwaters of the ice complex, Small streams – small delta branches, Byk_1H – Bykovskaya branch (hydrological cross section), Bul_1H – Bulkurskaya branch, Tum_1H – Tumatskaya branch (hydrological cross section), M_1H – Main channel (hydrological cross section), O_1H – Olenekskaya branch (hydrological cross section), O_2 – Olenekskaya branch, Chai-Tumus, O_3 – Olenekskaya branch, Gusinka, Tr_1H – Trofimovskaya branch (hydrological cross section).

Fig. 2. The ratio of hydrochemical components: a) $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO}$, b) $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ in suspended (circles) and bottom (triangles) of sediments in the Lena River delta. A group of branches is outlined in this figure that is characterized by the specific conditions of accumulation of chemical elements in bottom sediments.

References

1. Fedorova I., Chetverova A., Bolshiyarov D., Makarov A., Boike J., Heim B., Morgenstern A., Overduin P., Wegner C., Kashina V., Eulenbug A., Dobrotina E., Sidorina I. Lena Delta hydrology and geochemistry: Long-term hydrological data and recent field observations. *Biogeosciences*, 2015, vol. 12, pp. 345–363. doi: 10.5194/bg-12-345-2015.
2. Annual Data on the Quality of Surface Waters in the Area of the Omsk Department for Hydrometeorology and Environmental Monitoring’s Activity during 1989–1992. Vol. 6. Nos. 4–9. (In Russian)
3. Hydrological Yearbooks (Basins of the Laptev Sea, East Siberian Sea, and Chukchi Sea). Vol. 8. Nos. 0–7. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1960–1974. (In Russian)
4. State Water Cadaster. Annual Data on the Regime and Quality of Waters in Seas and Sea Outfalls of Rivers. 2002–2006. Part 2. Vols. 5–6. Yakutsk, 2010. (In Russian)
5. Ivanov V.V. The runoff and currents of the main arms of the Lena River delta. *Tr. Arkt. Nauchno-Issled. Inst. Gidrol. Rek Sov. Arkt.* Leningrad, Morsk. Transp., 1963, vol. 234, no. 5, pp.76–86. (In Russian)
6. Ivanov V.V. On the runoff of suspended and tractional sediments in the main arms of the Lena River delta. *Probl. Arkt. Antarkt.* Leningrad, Gidrometeoizdat, 1964, no. 18, pp. 31–40. (In Russian)
7. Ivanov V.V., Piskun A.A., Korabel’ R.A. Streamflow distribution along the main arms of the Lena delta. *Tr. Ordena Lenina Arkt. Nauchno-Issled. Inst.* Leningrad, Gidrometeoizdat, 1983, vol. 387, pp. 59–71. (In Russian)
8. Geocological State of the Arctic Coast of Russia and Safety of Nature Management. Alekseevskii N.I. (Ed.). Moscow, GEOS, 2007. 585 p. (In Russian)
9. Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Kosmenko L.S., Reshetnyak O.S. Anthropogenic transformation of aquatic environment composition in the Lena river mouth area. *Water Resour.*, 2011, vol. 38, no. 2, pp. 187–198. doi: 10.1134/S0097807811020126.
10. Rachold V., Alabyan A., Hubberten H.-W., Korotaev V.N., Zaitsev A.A. Sediment transport to the Laptev Sea – hydrology and geochemistry of the Lena River. *Polar Res.*, 1996, vol. 15, no. 2, pp. 183–196. doi: 10.1111/j.1751-8369.1996.tb00468.x.
11. Gordeev V.V., Dzhamaalov R.G., Zektser I.S., Zhulidov A.V., Bryzgalo V.A. Assessment of nutrient discharge with river and groundwater flow into marginal seas of the Russian Arctic regions. *Vodn. Resur.*, 1999, vol. 26, no. 2, pp. 206–211. (In Russian)

12. Vishnyakova I.I., Abramova E.N. The System of the Laptev Sea and Adjacent Arctic Seas: Modern State and Development History. *Organizatsiya zooplanktonnykh soobshchestv poligonal'nykh ozer yuzhnoy chasti del'ty r. Leny* [The Organization of Zooplanktonic Communities in the Polygonal Lakes of the Southern Part of the Lena Delta]. Moscow, 2009, pp. 265–277. (In Russian)
13. Abramova E., Vishnyakova I. New data about zooplankton species composition and distribution in the lakes of the Lena Delta. *Ber. Polar Meerforsch. Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA: The Expedition LENA 2008*. Wagner D., Overduin P., Grigoriev M.N., Knoblauch Ch., Bolshiyakov D.Yu. (Eds.). 2012, vol. 642, pp. 30–35.
14. Abramova E., Vishnyakova I., Torsten S. Hydrobiological investigations in the Lena Delta. *Ber. Polar Meerforsch. Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV SEA: The Expedition LENA 2006*. Boike Ju., Bolshiyakov D.Yu., Grigoriev M.N. (Eds.). 2007, vol. 566, pp. 6–8.
15. Nigamatzyanova G., Frolova L. Zooplankton communities of the Lena River delta (Siberia, Russia). *16th Int. Multidiscip. Sci. Geocnf. SGEM 2016*. 2016, book 5, vol. 2, pp. 643–650.
16. Nigamatzyanova G., Frolova L., Abramova E. Zooplankton spatial distribution in thermokarst lake of the Lena river delta (Republic of Sakha (Yakutia)). *Res. J. Pharm., Biol. Chem. Sci.*, 2016, vol. 7, no. 5, pp. 1288–1297.
17. Gukov A.Yu. Hydrobiology of the Estuarial Area of the Lena River. Moscow, Nauchn. Mir, 2001. 288 p. (In Russian)
18. Kraberg A. C., Druzhkova E., Heim B., Loeder M.J.G., Wiltshire K.H. Phytoplankton community structure in the Lena Delta (Siberia, Russia) in relation to hydrography. *Biogeosciences*, 2013, vol. 10, pp. 7263–7277. doi: 10.5194/bg-10-7263-2013.
19. Boike J., Kattenstroth B., Abramova K., Bornemann N., Chetverova A., Fedorova I., Fröb K., Grigoriev M., Grober M., Kutzbach L., Langer M., Minke M., Muster S., Piel K., Pfeiffer E.-M., Stoof G., Westermann S., Wischnewski K., Wille C., Hubberten H.-W. Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011). *Biogeosciences*, 2013, vol. 10, no. 3, pp. 2105–2128. doi: 10.5194/bg-10-2105-2013.
20. Morgenstern A., Ulrich M., Günther F., Roessler S., Fedorova I., Rudaya N., Wetterich S., Boike J., Schirmer L. Evolution of thermokarst in East Siberian ice rich permafrost: A case study. *Geomorphology*, 2012, vol. 201, pp. 363–379.
21. Morgenstern A., Röhr C., Grosse G., Grigoriev M. The Lena River Delta – Inventory of Lakes and Geomorphological Terraces. AWI, Res. Unit Potsdam, 2011. doi: 10.1594/PANGAEA.758728.
22. Grishakin K.V. Dynamics of Channel Flows. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1979. 311 p. (In Russian)
23. Methodological Recommendations on Collection and Processing of Materials during Hydrobiological Investigations of Fresh Water Bodies. Zooplankton and Its Production. Leningrad, GosNIORKh, 1982. 33 p. (In Russian)
24. Shannon C.E., Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana, Univ. Ill. Press, 1963. 117 p.
25. Bol'shiyakov D.Yu., Makarov A.S., Shnayder V., Stoph G. The Origin and Development of the Lena River Delta. St. Petersburg, ANII, 2013. 268 p. (In Russian)
26. Alekseevskii N.I., Aibulatov D.N., Kuksina L.V., Chetverova A.A. The structure of streams in the Lena delta and its influence on streamflow transformation processes. *Geogr. Nat. Resour.*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 63–70.
27. Fedorova I., Bolshiyakov D.Yu., Chetverova A., Makarov A., Tretiyakov M. Measured water discharges, suspended supply and morphometric parameters of cross-sections in the Lena River Delta during summer period 2002–2013. PANGAEA, 2013. doi: 10.1594/PANGAEA.808854.
28. Alekin O.A. Fundamentals of Hydrochemistry. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970. 413 p. (In Russian)
29. Grigor'yev M. N., Kunitskii V. V. Ice complex of the Arctic coast of Yakutia as an accretion source on the shelf. *Gidrometeorol. Biogeokhim. Issled. Arkt. Trudy Arkt. Reg. Tsentra*. Vladivostok, Dal'nevost. Otd. Ross. Akad. Nauk, 2000, vol. 2, part 1, pp. 109–116. (In Russian)
30. Savenko V.S. Chemical Composition of World River's Suspended Matter. Moscow, GEOS, 2006. 174 p. (In Russian)

31. Gordeev V.V. The Current Hydrological State of the Lena Delta. The System of the Laptev Sea and Adjacent Seas of the Arctic Region: The Current State and Development History. *Mikroelementy v vode, vzyesi i donnykh osadkakh Obskoy guby, Eniseyskogo zaliva i del'ty Leny i prilegayushchikh oblastey Karskogo morya i morya Laptevykh* [Microelements in Water, Suspended Matter, and Bottom Sediments of the Gulf of Ob, Yenisei Gulf, and Lena Delta and Adjacent Areas of the Kara Sea and the Laptev Sea]. Moscow, Mosk. Gos. Univ., 2009, pp. 202–224. (In Russian)
32. Abramova E.N., Sofronov Yu.N., Abramson N. Russian-German Cooperation SYSTEM LAPTEV-SEA 2000: The Expedition LENA 2001. *Biological Research in the Lena Delta*. Pfeiffer E.-M., Grigoriev N. (Eds.), 2002, pp. 42–43.
33. Nigamatzyanova G.R., Frolova L.A., Chetverova A.A., Fedorova I.V. Hydrobiological investigation of channels in the mouth region of the Lena River. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2015, vol. 157, no. 4, pp. 96–108. (In Russian)

Для цитирования: Четверова А.А., Федорова И.В., Фролова Л.А., Нигаматзянова Г.Р., Скороспехова Т.В., Шадрина А.А. Особенности формирования качественных характеристик вод и наносов в дельте реки Лены // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2017. – Т. 159, кн. 1. – С. 122–138.

For citation: Chetverova A.A., Fedorova I.V., Frolova L.A., Nigamatzyanova G.R., Skorospekhova T.V., Shadrina A.A. On the specifics of formation of the qualitative characteristics of waters and sediments in the Lena River delta. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2017, vol. 159, no. 1, pp. 122–138. (In Russian)