

ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.89

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-186-200

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И НОВЕЙШАЯ ТЕКТОНИКА ДЕЛЬТЫ Р. ЛЕНЫ

Д.Ю. БОЛЬШИЯНОВ¹, А.О. АКСЕНОВ^{1,2*}, А.С. МАКАРОВ^{1,2}, Е.И. ЛАЗАРЕВА³,
С.А. ПРАВКИН¹, А.А. ЧЕРЕЗОВА³, М.Н. ГРИГОРЬЕВ⁴

¹ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический НИИ, Санкт-Петербург, Россия

² — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ — ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского», Санкт-Петербург, Россия

⁴ — Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

*aksenov2801@gmail.com

GEOMORPHOLOGICAL STRUCTURE AND NEOTECTONICS OF THE LENA DELTA

D.Y. BOLSHIYANOV¹, A.O. AKSENOV^{1,2*}, A.S. MAKAROV^{1,2}, E.I. LAZAREVA³, S.A. PRAVKIN¹,
A.A. CHEREZOVA³, M.N. GRIGORIEV⁴

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² — Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

³ — A.P. Karpinsky Russian geological research institute, Saint-Petersburg, Russia

⁴ — Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

*aksenov2801@gmail.com

Received April, 29, 2019

Accepted May, 31, 2019

Keywords: geomorphology, Ice Complex, Lena Delta, neotectonics, sea-level fluctuations.

Summary

New data about geomorphological structure and neotectonic movements of the Lena Delta is presented. They are based on results of the Russian-German expeditions Lena-2013, Lena-2014, Lena-2015 and Lena-2018 and include geomorphological profiling with high quality satellite instruments and a number of radiocarbon dates on the Sobo-Sise, Kurungnakh, Jangylakh-Sis and Khardang-Sise islands. These islands consist of the Late Pleistocene Ice Complex (IC) remnants eroded by river and sea, and the first terrace of the Delta, which adjoins the remnants. The first terrace

Citation: Bolshiyarov D.Y., Aksenov A.O., Makarov A.S., Lazareva E.I., Pravkin S.A., Cherezova A.A., Grigoriev M.N. Geomorphological structure and neotectonics of the Lena delta *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 2: 186–200. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-186-200.

started to form 8,000 years ago in the western part of the Delta and was finally formed in the last millennium in the eastern part of the Delta. From the previous works, it is known that the western part of the Delta is higher than the eastern part. In our work, we explain it by the uneven movements of the Earth's crust in this region. The aim of the paper is to study the quantitative characteristics of the tectonic movements in the Lena River Delta. For this purpose we present the geomorphological schemes and descriptions of the islands mentioned and compare the terraces heights in the different parts of the Delta. In the Late Pleistocene, according to the heights of the IC remnants, the western part of the Delta rose 1 mm per year faster than its eastern part. In the Holocene the speed difference increased to approximately 2 mm per year, which is shown by the terrace surface's altitude. The amplitude between the western and eastern parts of this surface is about 4 m. Finally, according to 60-years observation period of the water level in the Laptev Sea, the modern speed difference of the western and eastern parts movement in the Lena Delta is 2 mm per year. As a result, we can observe changes in the main flow direction in the Delta channels from the Olenekskaya branch at the beginning of Holocene to the Bykovskaya branch today.

Поступила 29 апреля 2019 г.

Принята к печати 31 мая 2019 г.

Ключевые слова: геоморфология, дельта Лены, колебания уровня моря, ледовый комплекс, неотектоника.

В данной работе представлены данные, полученные в результате экспедиций «Лена», в ходе которых было проведено геоморфологическое профилирование и отбор образцов для радиоуглеродного датирования на островах Собо-Сисё, Курунгнах, Джангылах-Сис и Харданг-Сисё, являющихся останцами позднеплейстоценовых отложений ледового комплекса с примыкающей к ним голоценовой террасой. Представленные на основе этих материалов результаты позволяют нам уточнить направления и скорости движений земной коры в дельте. Для этого составлены геоморфологические схемы островов с последующим описанием. Также определены амплитуда, скорости и направленность позднеплейстоценовых, голоценовых и современных тектонических движений. Выявлен тектонический перекося дельты с запада на восток, выражающийся в разном высотном положении поверхностей ледового комплекса и первой террасы. Установлено, что начиная с 20000 лет назад разница в скоростях движений между западной и восточной и западной частей составляла приблизительно 1 мм/год. В современную эпоху (с 2000 лет до н.э.) скорости увеличились до 2 мм/год, что было выделено по разнице высот первой террасы дельты. Это также согласуется и с данными равномерных наблюдений.

ВВЕДЕНИЕ

Неравномерность тектонических движений в дельте р. Лены, проявляющаяся в разных скоростях подъема поверхности восточной и западной частей дельты, отмечалась ранее [1]. В обобщающей работе по происхождению дельты [2] по разрезам четвертичных отложений приведены данные непосредственных наблюдений за перекося земной поверхности в дельте и количественно охарактеризован процесс перераспределения современного стока воды в восточные и юго-восточные протоки дельты в результате новейших тектонических движений. В данной работе на основании значительно более точного геоморфологического профилирования с помощью спутникового геодезического оборудования, а также датирования первой террасы определены порядки скоростей неотектонических и современных движений земной коры в районе дельты р. Лены.

Одна из интереснейших особенностей дельты р. Лены — поворот ее основного течения практически вспять при выходе из долины («ленской трубы»), стесненной горными сооружениями. Быковская протока течет на юго-восток, тогда как до разветвления у о. Столб направление течения реки Лены — северо-западное. Уже по

одному этому признаку понятно, что в дельте реки имеет место перекося земной поверхности, заставляющий столь крупный поток отклоняться в противоположном генеральному стоку направлении. Другая особенность дельты — это наличие останцов более древних поверхностей, которые к собственно дельте не имеют отношения. Это останцы ледового комплекса пород и отдельный остров Арга-Муора-Сисё в северо-западной части дельты, представляющий собой останец аллювиально-морской равнины, поднятый тектоническими движениями выше уровня моря. Останцы ледового комплекса пород давно привлекают внимание исследователей, в частности, разновысотностью в западной и восточной частях дельты. В первой основательной работе о геоморфологическом строении дельты [1] делается вывод о том, что западная часть дельты приподнята относительно восточной. В недавней работе [2], посвященной происхождению и развитию дельты Лены, описаны наблюдения за постепенными изменениями положения контакта между породами ледового комплекса и подстилающими их песками в южной части о. Курунгнах. Это интерпретировано как результат тектонического перекося. При рассмотрении

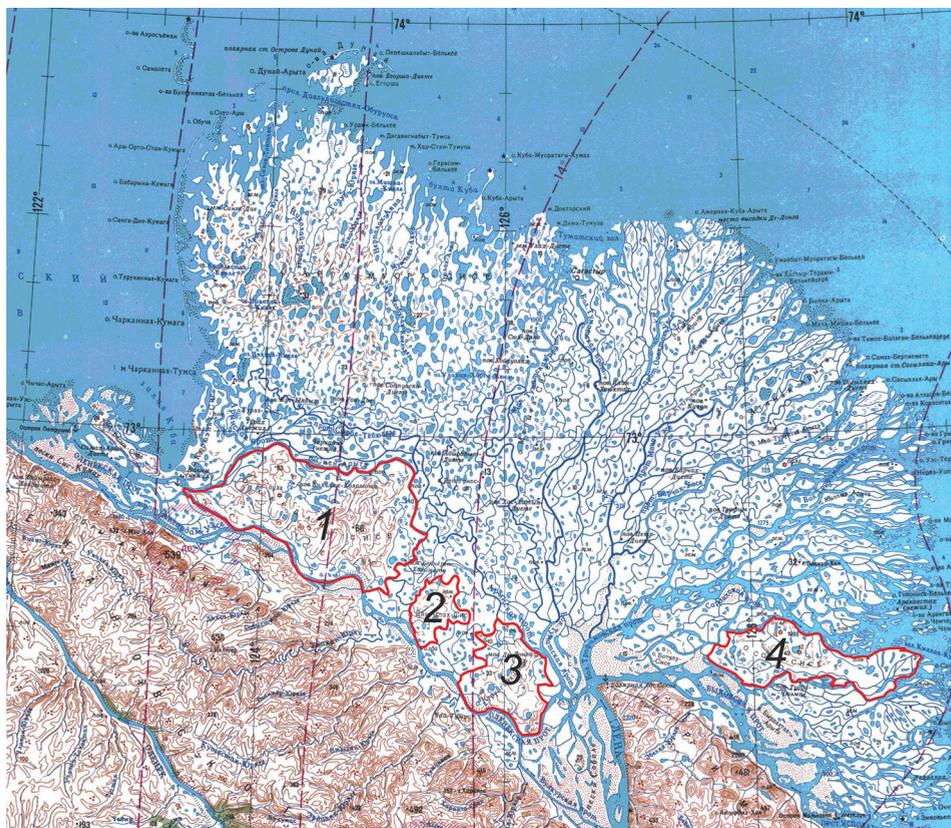


Рис. 1. Фрагмент топографической карты листа S-51,52 масштаба 1:1000000.

1 — остров Харданг-Сисё, 2 — остров Джангылах-Сисё, 3 — остров Курунгнах, 4 — остров Собо-Сисё

Fig. 1. The fragment of the topographical map S-51,52, scale — 1:1000000.

1 — Khardang-Sise island, 2 — Jangylakh-Sis island, 3 — Kurungnakh island, 4 — Sobo-Sise island

количественных характеристик стока по протокам дельты стало очевидно продолжающееся перераспределение стока воды и наносов в юго-восточном направлении. Строение первой аллювиально-морской террасы дельты показало, что при значительных колебаниях уровня моря в голоцене сток реки мигрировал от северо-западного направления (Оленёкская протока) около 8000 лет назад через центральные протоки к юго-востоку. И это разворачивающееся к юго-востоку смещение основного стока реки происходило не только благодаря постоянному перекосу земной поверхности, но и из-за того, что еще в позднем голоцене река не могла стекать на юго-восток из-за перегораживающего влияния барьера останцов ледового комплекса, который разрушился лишь в самом конце голоцена около 1500 лет назад, когда и образовалась Быковская протока [2].

Задачами дальнейшего изучения геоморфологического строения дельты после понимания основных закономерностей развития дельты стали конкретизация и уточнение того, какие именно порядки скоростей движения земной коры имеют место в дельте Лены.

С этой целью в течение трех полевых сезонов в дельте изучались останцы ледового комплекса пород и прислоняющихся к ним массивов первой террасы по островам: Собо-Сисё, Курунгнах, Джангылах-Сисё, Харданг-Сисё (рис. 1).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Фактический материал для данного исследования был получен в ходе ряда российско-германских экспедиций «Лена», организованных ААНИИ, Институтом полярных и морских исследований имени Альфреда Вегенера (Германия) и Институтом мерзлотоведения (г. Якутск). В экспедиции «Лена-2013» проведены полевые работы на острове Курунгнах, включавшие в себя: геодезическое профилирование, описание разрезов четвертичных отложений и рельефа. В экспедиции «Лена-2014» проведены такие же работы на о. Собо-Сисё, в 2015 г. — на островах Харданг-Сисё и Джангылах-Сис. В экспедиции «Лена-2018» снова отобраны образцы и проведены геоморфологические наблюдения на о. Собо-Сисё. Для геодезического профилирования использовались электронный тахеометр ZeissElta C30 фирмы SMI с точностью 3'' и максимальным расстоянием 2500 м и GNSS приемник Leica GS10 с точностью определения высот до 25 см. Нивелировки выполнялись от уровня воды в протоках. Так как значения уровня воды в протоках дельты постоянно меняются, все нивелировки приведены к уровню водомерного поста полярной станции им. Ю.М. Хабарова (о. Столб) в дни построения профилей. Для каждой нивелировки вычислено превышение относительно отметки уровня в 317 см (уровень, наблюдаемый 10.08.2014, 17.08.2015 и 18.08.2015), после чего в профили введены поправки к нивелировкам, графические построения по которым оказались приведенными к уровню «317 см» над нулем водомерного поста полярной станции им. Хабарова (рис. 2). Также во время нивелирований устанавливались временные водомерные рейки, по которым отмечался ход уровня в протоках. В Оленёкской протоке ход уровня воды весьма изменчив в результате действия приливно-отливных и сгонно-нагонных явлений, которые в восточных протоках существенно меньше влияют на ход уровня воды. Чтобы выявить роль этих явлений, были проведены уровенные наблюдения на о. Харданг-Сисё в период с 13 по 22 августа 2015 г. За этот период отметка уровня в Оленёкской протоке у о. Харданг изменялась в пределах ± 18 см от нуля рейки. Поэтому приблизительная точность измерений высот террас относи-

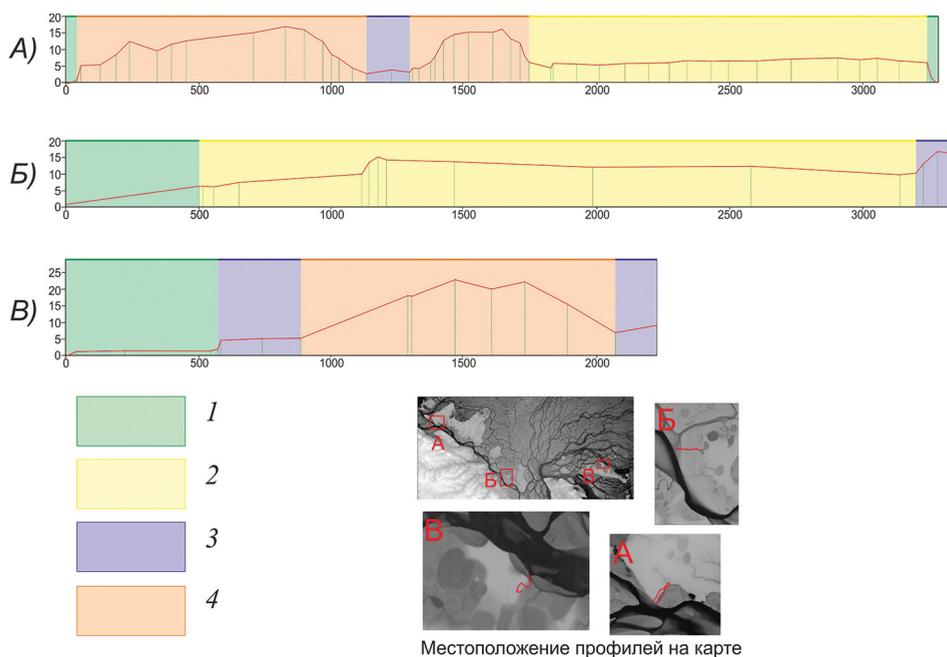


Рис. 2. Примеры геоморфологических профилей на островах Харданг-Сисё, Курунгнах и Собо-Сисё.

A — геоморфологический профиль, о. Харданг-Сисё, 17.08.2015; *B* — геоморфологический профиль, о. Курунгнах, 23.07.2013; *B* — геоморфологический профиль, о. Собо-Сисё, 13.08.2014; 1 — пойма, 2 — первая терраса, 3 — термокарстовые котловины, 4 — ледовый комплекс

Fig. 2. Examples of geomorphological profiles on Khardang-Sise, Kurungnakh and Sobo-Sise islands.

A — geomorphological profile, Khardang-Sise island, 17.08.2015; *B* — geomorphological profile, Kurungnakh island, 23.07.2013; *B* — geomorphological profile, Sobo-Sise island, 13.08.2014; 1 — flood plain, 2 — first terrace, 3 — thermokarst basins, 4 — ice complex

тельно уровня воды на водомерном посту станции им. Ю.М. Хабарова составляет $\pm 0,2$ м. Для точной оценки ошибки нет данных связки уровней водомерных постов на станции и в протоках.

Геоморфологические схемы островов, объектов исследований, составлены на основе геоморфологических профилей геоморфологических съемок в вышеперечисленных экспедициях, а также с помощью дешифрирования спутниковых снимков Landsat-7. Для создания топоосновы взяты цифровая модель рельефа ArcticDEM университета Миннесоты с разрешением 32 м [3] и топографические карты Генштаба S-52-33_34, S-52-31_32, S-51-35_36, S-51-29_30, S-51-27_28 масштаба 1:200000 [4]. В итоге получены геоморфологические схемы островов Курунгнах и Собо-Сисё масштаба 1:200000 и геоморфологическая схема острова Харданг-Сисё масштаба 1:250000.

Для вычисления значений высот поверхностей террасы и аласов использованы геоморфологические профили экспедиций 2013, 2014 и 2015 гг. Выбраны участки профилей, проходящих через нужную поверхность, имеющиеся значения высот осреднены и экстраполированы. Таким образом, вычислены значения высот первой террасы для островов Собо-Сисё, Курунгнах, Джангылах-Сис и Харданг-Сисё. Возраст отложений террасы определялся по данным радиоуглеродного датирования,

проведенного в Лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана Института наук о Земле СПбГУ (индекс ЛУ+номер образца) [5]. Калибровка дат сделана в программе OxCal 4.3 с использованием калибровочной кривой «IntCal 13» [6]. Также использованы предшествующие опубликованные датировки [2,7]. Датировки, выполненные методом ИК-ОСЛ (инфракрасно оптически стимулированной люминесценции), получены в Таллинском технологическом университете (индекс RLQG+номер образца) [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геоморфологическое строение островов

Острова Харданг-Сисё, Курунгнах и Собо-Сисё представляют собой останцы пород ледового комплекса, к которым причленены поверхности других террас. Отложения первых двух островов состоят из нижней песчаной толщи и залегающими на них алевритами с растительными остатками, которые пронизаны мощными ледяными жилами. Эта верхняя пачка и называется ледовым комплексом пород (далее — ЛК). Песчаная пачка о. Собо-Сисё скрыта под водами Сардахской протоки, как и на всех других останцах ЛК восточной части дельты. Время формирования песков определено методом датирования ИК-ОСЛ и составляет 88–65 тысяч лет назад. Нижняя часть пород ЛК формировалась 50–60 тыс. лет назад (л.н.), средняя 45–25 тыс. л.н. и верхняя 23–12 тыс. л.н. [2]. По этим данным формирование подстилающих ЛК песков происходило в морском бассейне в условиях достаточной глубины для того, чтобы осадки не промерзли. А породы ЛК формировались в обмелевшем бассейне, где вместе с осадконакоплением алевритов и песков происходило их промерзание, что привело к формированию мощных ледяных жил. Гипотеза морского происхождения ЛК не поддерживается большинством исследователей, но имеет достаточное количество фактов, изложенных в книге, посвященной этой проблеме [2]. Новые факты позволяют продолжать утверждать, что формирование ЛК происходило под влиянием моря. Так, последние независимые данные о геохимическом составе пресных вод озер, развитых на останцах ЛК, показывают, что в них велики концентрации таких элементов, как Na, Cl и Sr [9], что убедительно доказывает проникновение морских вод в бассейн, в котором формировались отложения ЛК, играющие теперь важную роль в минерализации пресных озерных вод. Поверхность отложений ЛК является по существу террасой, и после того как она сформировалась, она была одновысотной на территории всей дельты. Это допущение необходимо принять для выполнения дальнейших реконструкций деформаций поверхности в результате тектонических движений. Но это и геоморфологическое доказательство формирования ЛК как прибрежно-морской террасы.

Остров Собо-Сисё (рис. 3) расположен в юго-восточной части дельты Лены. Он вытянут в широтном направлении. Его длина достигает 62 км, ширина — до 20 км. Максимальная высота острова — 42 м. С юга остров омывается протоками Корюэлях-Уэся, Кубалыр-Уэся и Чочур-Буор-Уэся, на севере — Сардахской протокой.

Денудационно-эрозионный останец острова имеет высоты в пределах 20–40 м. Он представляет собой грядовое повышение с наиболее высокими отметками в осевой части острова. Значительную часть его поверхности определяет термокарстовый рельеф. Наиболее крупные котловины приурочены к северной, северо-западной частям острова, где они сливаются между собой в единые комплексы. Высота таких

комплексов от уреза воды составляет 5–10 м. В восточной части высота останца уменьшается до 10–20 м и сложена иными осадками по сравнению с ЛК основной части острова. Здесь представлены пески и алевриты с растительными остатками, откладывавшимися в водоеме. Возраст растительных остатков 16630 ± 130 л.н. (ЛЮ-4913) с высоты 5 м над уровнем реки-залива воспринимался как ошибка датирования, так как общепринятая точка зрения о том, что в сартанское время позднего неоплейстоцена уровень моря был значительно ниже современного, не позволяла рассматривать отложения как осадки сартанского бассейна, связанного с морем. Отложения были снова датированы с помощью метода ИК-ОСЛ. Возраст песков и алевритов оказался равным $14,8 \pm 1,2$ тыс. л.н. (RLQG 2394-125). Вторая датировка подтвердила первую, и теперь можно достаточно обоснованно утверждать, что накопление отложений в бассейне с более высоким стоянием уровня вод относительно современного происходило здесь в сартанское время. Во всяком случае, восточная пониженная часть о. Собо-Сисё представлена отложениями иного возраста по сравнению с ЛК. Это геологическое тело прислонилось к разрушаемому останцу ЛК, как позже произошло с поверхностью первой террасы.

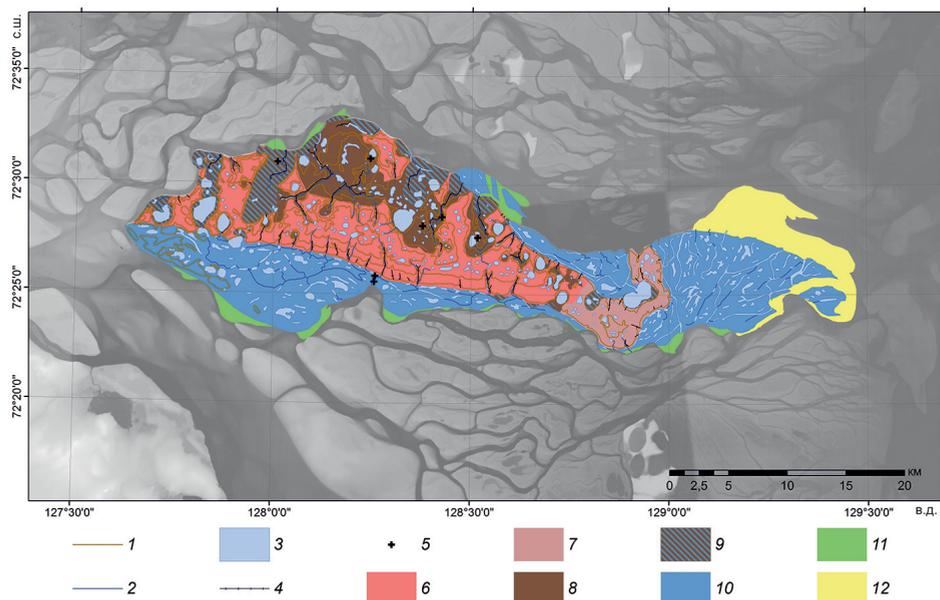


Рис. 3. Геоморфологическая схема о. Собо-Сисе.

1 — изолинии, через каждые 10 м, 2 — реки, ручьи, 3 — озера, старицы, протоки, 4 — термоэрозийные долины, 5 — булгуньяхи, 6 — эрозийно-денудационный останец, сложенный отложениями ледового комплекса (20–40 м), 7 — поверхность высотой 10–20 м, 8 — термокарстовые котловины (6–8 м), 9 — периодически затопляемые термокарстовые котловины (5–6 м), 10 — первая терраса (2–9 м), 11 — речная пойма (0–2 м), 12 — песчаные отмели

Fig. 3. Geomorphological scheme of Sobo-Sise island.

1 — isolines, every 10 m, 2 — rivers, small streams, 3 — lakes, oxbows, channels, 4 — thermoerosional valleys, 5 — pingos, 6 — ice complex remnant (20–40 m), 7 — surface 10–20 m high, 8 — thermokarst basins (6–8 m), 9 — occasionally flooded thermokarst basins (5–6 m), 10 — first terrace (2–9 m), 11 — flood plain (0–2 m), 12 — sandy bars

Первая терраса в основном развита в южной и восточной частях острова. Ее поверхность постепенно понижается по направлению к краю дельты и по результатам профилирования имеет высоты от 5 до 7 м в западной половине острова. В восточной части эта терраса образована конусом выноса одной из палеопроток дельты. Здесь ее высоты понижаются до 2–3 м. На поверхности представлены полигонально-жильный микрорельеф, аласы, параллельно направлению стока расположены старицы и протоки. Данная терраса является разновозрастным образованием, что связывается с периодическими колебаниями уровня моря. Так, на западном окончании острова ее возраст оценивается в 4400 ± 80 лет, в северной части острова увеличивается до 5220 ± 60 лет, а в районе конуса выноса на востоке острова составляет 2920 ± 70 лет [2].

Отдельно на схеме геоморфологического строения выделены периодически затапливаемые термокарстовые котловины. В одном из аласов, на расстоянии 650 м от берега и на высоте 7,45 м, был найден образец плавника древесины с возрастом менее 200 лет. Поверхность дна термокарстовых котловин не отличима от поверхности первой террасы. В котловинах и на террасе присутствуют старицы, протоки, свидетельствующие об их речном происхождении. Термокарстовые котловины являются свидетелями термо-

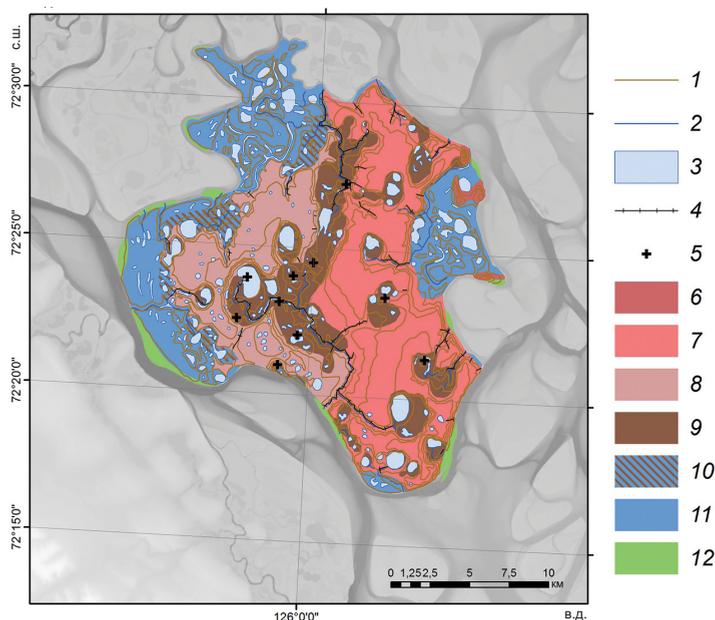


Рис. 4. Геоморфологическая схема о. Курунгнах.

1 — изолинии, через каждые 10 м, 2 — реки, ручьи, 3 — озера, старицы, протоки, 4 — термоэрозийные долины, 5 — булгуньяхи, 6 — эрозийно-денудационный останец, сложенный отложениями ледового комплекса (55–65 м), 7 — эрозийно-денудационный останец, сложенный отложениями ледового комплекса (35–55 м), 8 — поверхность высотой 20–35 м, 9 — термокарстовые котловины (5–15 м), 10 — периодически затапливаемые термокарстовые котловины (5–12 м), 11 — первая терраса (10–12 м), 12 — речная пойма (0–2 м)

Fig. 4. Geomorphological scheme of Kurungnakh island.

1 — isolines, every 10 m, 2 — rivers, small streams, 3 — lakes, oxbows, channels, 4 — thermoerosional valleys, 5 — pingos, 6 — ice complex remnant (55–65 m), 7 — ice complex remnant (35–55 m), 8 — surface with 20–35 m altitude, 9 — thermokarst basins (5–15 m), 10 — occasionally flooded thermokarst basins (5–12 m), 11 — first terrace (10–12 m), 12 — flood plain (0–2 m)

эрозионной и аккумулятивной деятельности реки. Периодические повышения уровня приемного водоема вызывали разрушение пород ЛК, термоэрозию и одновременную аккумуляцию как в котловинах, так и на окружающих останец ЛК пространствах.

Остров Курунгах (рис. 4) находится в центральной части дельты, практически в ее вершине. Он омывается Оленёкской протокой с юга, Большой Туматской с востока и протокой Конон-Тебюлеге с запада. Его длина достигает 30 км, а ширина — 25 км. Останец ледового комплекса расположен на высотах 35–50 м. На его поверхности представлены формы полигонально-жильного рельефа, термокарстовые озера, термоэрозионные долины. Поперек острова в меридиональном направлении аласы сливаются в единую долину, разделяющую останец на более низкую западную часть и более высокую восточную. Долина образована, вероятно, в результате термоденудации во время одного из повышений базиса эрозии в прошлом. Не исключено, что западная низкая часть останца ЛК, как и на о. Собо-Сисё, имеет более молодой возраст и приключена к ЛК в результате накопления осадков в совершенно другом, по сравнению с отложениями ЛК, бассейне.

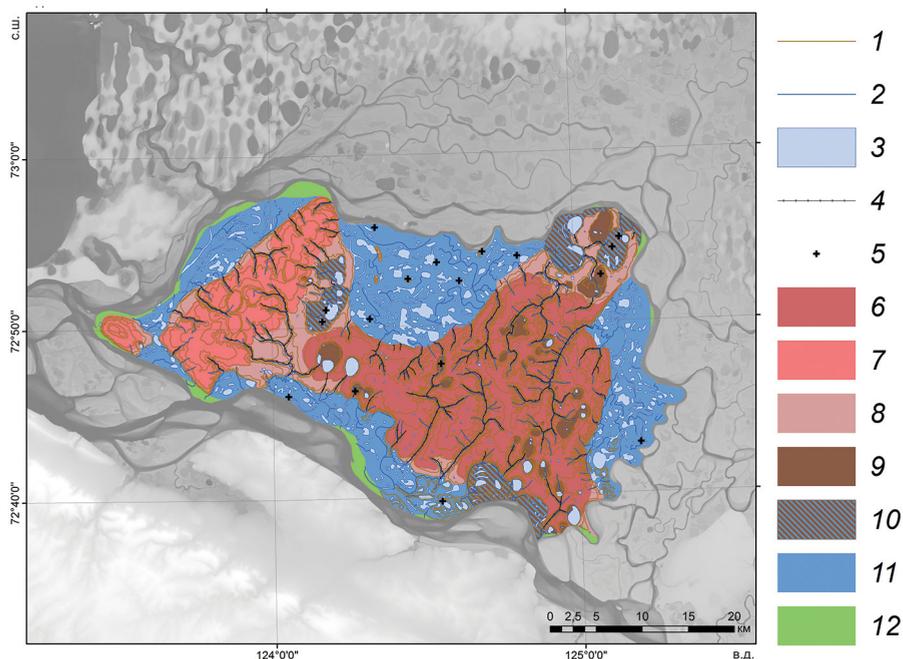


Рис. 5. Геоморфологическая схема острова Харданг-Сисе.

1 — изолинии, через каждые 10 м, 2 — реки, ручьи, 3 — озера, старицы, протоки, 4 — термоэрозионные долины, 5 — булгуньяхи, 6 — эрозионно-денудационный останец, сложенный отложениями ледового комплекса (50–65 м), 7 — эрозионно-денудационный останец, сложенный отложениями ледового комплекса (30–50 м), 8 — поверхность высотой 10–30 м, 9 — термокарстовые котловины (5–15 м), 10 — периодически затопляемые термокарстовые котловины (5–10 м), 11 — первая терраса (6–9 м), 12 — речная пойма (0–2 м)

Fig. 5. Geomorphological scheme of Khardang-Siseisland.

1 — isolines, every 10 m, 2 — rivers, small streams, 3 — lakes, oxbows, channels, 4 — thermoerosional valleys, 5 — pingos, 6 — ice complex remnant (50–65 m), 7 — ice complex remnant (30–50 m), 8 — surface with 10–30 m altitude, 9 — thermokarst basins (5–15 m), 10 — occasionally flooded thermokarst basins (5–10 m), 11 — first terrace (6–9 m), 12 — flood plain (0–2 m)

На восточном краю острова наблюдаются отдельные останцы высотой 45–65 м. Также встречаются булгунняхи. Глубина термокарстовых просядок достигает 20 м.

Первая терраса причленяется к останцу с северо-востока, северо-запада и запада. По результатам профилирования ее высоты составляют 10–12 м относительно уреза воды. На ее поверхности также представлены аласы, старицы, протоки, полигонально-жильный рельеф. В целом поверхность террасы на острове более расчленена, чем на о. Собо-Сисё.

Остров Харданг-Сисё (рис. 5) расположен в юго-западной части дельты реки Лены. С юга его берега омывает Оленёкская протока, остальная часть острова окружена Арынской протокой. Длина между крайними точками острова составляет примерно 64 км, а ширина — 40 км. Максимальная отметка высоты — 66 м. Поверхность останца ледового комплекса не является однородной, осложнена термокарстовыми озерами и аласами, термоэрозионными долинами с амплитудой высот до 50 м.

В строении рельефа останца острова можно выделить 3 основных уровня. Верхний имеет высоты 50–65 м, средний — 30–50 м, нижний — 10–30 м. Не исключено, что нижний уровень острова представляет собой более молодое образование, причлененное к останцу ЛК, как на о. Собо-Сисё. В отличие от других рассматриваемых островов, термоэрозионные процессы на о. Харданг-Сисё интенсивно развиты, длина термоэрозионных долин иногда достигает 15 км, а в устье их ширина увеличивается до 1,2–1,3 км.

Термокарстовый рельеф на останце ледового комплекса развит меньше, чем в восточной части дельты. Относительная высота аласов может различаться в зависимости от их положения, а глубина просядки составляет приблизительно 10 м. Иногда в осушенных аласах можно наблюдать булгунняхи высотой до 10 м.

Поверхность первой террасы имеет наклон к краю дельты. По результатам профилирования в юго-западной части острова ее высота достигает 6–7 м. В юго-восточной части острова высота террасы повышается до 9–10 м. На поверхности развиты термокарстовые котловины, многочисленные старицы и протоки, пересекающиеся и сливающиеся между собой. На террасе также сформирована сеть мерзлотных полигонов. Здесь представлены и булгунняхи, причем большая их часть сконцентрирована на северной террасе острова. Поверхность первой террасы и нижнего яруса аласов сливаются по высоте, и эти термокарстовые котловины достигают 6 км в длину.

ВЫСОТЫ И ВОЗРАСТ ЛК И ПЕРВОЙ ТЕРРАСЫ

Высота островов Харданг-Сисё и Курунгнах 65–66 м. Высота острова Собо-Сисё до 45 м. Полученные значения высот останцов ЛК и первой террасы представлены на рис. 6. Разница высот, или перекося поверхности ЛК между восточной и западной частями дельты, 20 м. Причем границей этих частей дельты с разным тектоническим режимом является осевая линия, продолжающаяся от направления «Ленской трубы». Очевидно, что эта линия раздела проходит по разлому земной коры, который доказан как косвенно [10], так и прямыми геофизическими методами [2]. Поверхность этой террасы сформировалась не позже 20 тысяч лет назад. Если принять такой возраст, то с тех пор относительный подъем поверхности западной части дельты относительно восточной ее части происходил со скоростью 1 мм/год. Однако перекося поверхности происходил и ранее. В южной части о. Курунгнах подстилающие ЛК пески воздымаются в юго-западном направлении на 8 м на

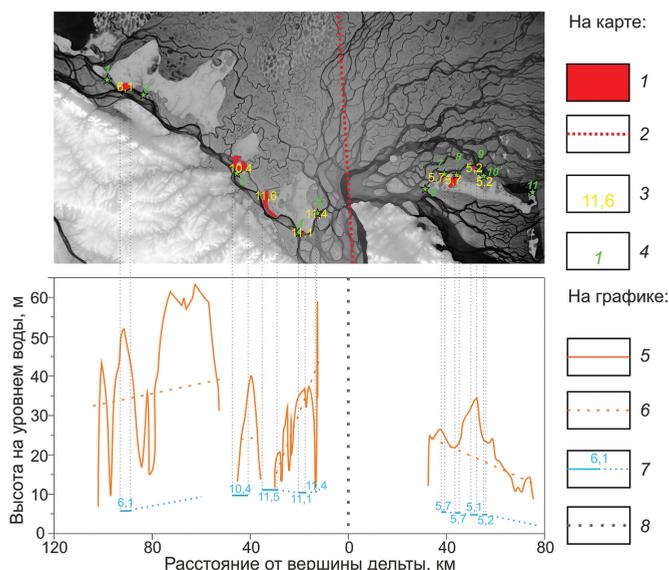


Рис. 6. Соотношение высот первой террасы и ледового комплекса на островах дельты р. Лены
 1 — измеренные поверхности террасы, 2 — линеймент, обусловленный разломом земной коры, 3 — полученные средние значения высот, 4 — места отбора образцов на радиоуглеродное датирование (см. таблицу ниже), 5 — профили останцов ЛК, 6 — линии трендов высот ЛК, 7 — профили и высоты первой террасы, 8 — вершина дельты

Fig. 6. Correlation of first terrace's and ice complex's altitude on Lena Delta islands

1 — measured terrace surfaces, 2 — fault linear structure, 3 — average values of altitude, 4 — sample sites for radiocarbon dating (the table below), 5 — profiles of IC remnants, 6 — trend lines of IC altitude, 7 — profiles and altitude of first terrace, 8 — delta apex

протяжении 4 км [2], а это означает, что неравномерное относительное поднятие происходило до начала формирования ЛК около 50 000 лет назад.

Первая аллювиально-морская терраса также имеет разную высоту (см. рис. 6). Она в целом понижается по направлению к краям дельты в соответствии с распластыванием водного потока в устьевой области реки. Но даже первая терраса сильно разнится по высоте в западной и восточной частях дельты. На о. Харданг-Сисё геодезическим путем получена только одна отметка в 6,1 м. Но ее поверхность повышается до 9–10 м в юго-восточном направлении к оголовью острова. На о. Джангылах-Сис средняя высота террасы равна 10,4 м. На о. Курунгнах высота первой террасы увеличиваются до 11,1–11,5 м. Высоты аласов и первой террасы на о. Собо-Сисё — 5,2–5,7 м. Терраса острова постепенно понижается в восточном направлении до 2–3 м.

Ниже (см. таблицу) представлены все имеющиеся к настоящему времени датировки первой террасы по изучаемым островам. В этом списке прослеживаются несколько интервалов, которые могут быть связаны с циклами трансгрессии/регрессии: 6900–6500 лет назад, 5200–5100 лет назад, 4400 лет назад, 3500–2800 лет назад, 760–540 лет назад и 200 лет назад.

Наиболее поддержанной данными датирования трансгрессией моря при формировании отложений первой террасы является повышение базиса эрозии около 2000 лет

назад [2]. Относительность радиоуглеродных датировок в дельте р. Лены очевидна потому, что органические осадки, слагающие существенную часть тела первой террасы, переоткладывались многократно из более древних отложений. И только значительное количество датировок дает надежду на определение приблизительного возраста террасы. Двухтысячелетний возраст террасы подкрепляется данными датирования морских террас и событий проникновения морских вод в пресноводные бассейны в результате трансгрессии около 2000 лет назад. Поэтому для расчета неотектонических движений в дельте по первой террасе принимается возраст ее формирования в 2000 лет. Но необходимо понимать, что и последующие колебания уровня моря (например, около 1000–800 и 200 лет назад) также участвовали в формировании первой террасы дельты р. Лены [2]. Имея превышение в высотах первой террасы как минимум в 4 м, получаем скорость поднятия западной части дельты относительно восточной в течение последних 2000 лет, приблизительно равную 2 мм/год.

Полученные скорости неравномерных тектонических движений на протяжении последних 20 000 лет можно сравнить с современными скоростями движений. По данным равномерных наблюдений на полярных станциях Усть-Оленёк (к западу от дельты) и Тикси (к востоку от дельты) отмечено повышение уровня моря в Тикси со скоростью 1,62 мм/год за 60 лет наблюдений в XX в. и понижение уровня моря со скоростью 0,46 мм/год за тот же период наблюдений на станции Усть-Оленёк [11]. В сумме разница в перекосе водной поверхности составляет 2,06 мм/год, что практически совпадает с рассчитанными скоростями перекоса земной поверхности (первой террасы) за

Таблица

Список датировок первой террасы рассматриваемых островов

Координаты	Источник	Высота поверхности, м	Высота отбора, м над урезом воды	Лаборатория, №	Радиоуглеродный возраст, лет
72°45'25" с.ш. 124°05'26" в.д.	Большаянов Д.Ю. и др., 2013	5–7	2,0	ЛУ-4411	5100±140
72°48'06" с.ш. 123°37'28" в.д.	Большаянов Д.Ю. и др., 2013	4–5	2,0	ЛУ-4414	2850±200
72°29'33" с.ш. 125°18'45" в.д.	Большаянов Д.Ю. и др., 2013	9–13	7,6 10,7	ЛУ-4409 ЛУ-4407	6890±170 6520±130
72°21,713' с.ш. 126°19,588' в.д.	Большаянов Д.Ю. и др., 2013	8–10	7 3,5	ЛУ-4565 ЛУ-4609	540±60 3170±50
	Коротаев В.Н., 1984	8–12		МГУ-862	3480±500
72°27'54" с.ш. 127°37'54" в.д.	Экспедиция «Лена-2014»	6–7	6,5	ЛУ-7582	4400±80
72°31'16" с.ш. 127°52'02" в.д.	Экспедиция «Лена-2014»	6–7	4	ЛУ-7581	760±50
72°31'11" с.ш. 128°00'54" в.д.	Экспедиция «Лена-2014»	4–5	4,5	ЛУ-7580	≤ 200
72°32'07" с.ш. 128°18'28" в.д.	Большаянов Д.Ю. и др., 2013	4	0,5	ЛУ-4916	5220±60
		6	6	ЛУ-7578	≤ 200
72°27,441' с.ш. 128°57,252' в.д.	Большаянов Д.Ю. и др., 2013	2–2,5	1,0	ЛУ-4919	2920±70

период в последние 2000 лет. Здесь совсем неважным является кажущееся совпадение сравниваемых результатов. Оно может быть и случайным. Важным является тренд на неравномерность тектонических движений, который сохраняется уже десятки тысяч лет и подтверждается данными наблюдений современных колебаний уровня моря.

ВЫВОДЫ

В результате проведения геоморфологических исследований с помощью геодезического профилирования по островам восточной и западной части дельты определены скорости неравномерных неотектонических движений, приводящих к перекосу земной и водной поверхности и смещению стока реки Лены в устье в восточном и юго-восточном направлении. Разница в скоростях неотектонических движений на протяжении периода порядка 20 000 лет составляет 1 мм/год с относительным повышением западной части дельты по сравнению с ее восточной частью. За последние 2000 лет неравномерность тектонических движений возросла. Западная часть дельты р. Лены воздымается относительно восточной части со скоростью 2 мм/год.

Геоморфологические исследования показывают, что согласно такому перекосу земной поверхности восточная и западная части дельты р. Лены значительно отличаются в ходе современных геоморфологических процессов. Быковская протока (крайняя юго-восточная) представляет собой эстуарий. Юго-западная Оленёкская протока развивается в режиме русловой многоруканности и постепенно отмирает, подпитываясь половодным стоком по Булкурской протоке, имеющим место только на пике половодья.

Формирование первой террасы дельты происходило в несколько этапов в голоцене в зависимости от смены трансгрессивных и регрессивных фаз с постепенным размывом останцов ЛК и смещением дельтоформирования с запада на восток. Подъем уровня моря всегда сопровождался размывом останцов ЛК и образованием новых термокарстовых котловин, в которых затем накапливались аллювиально-морские отложения. Размыв этих осадков на стадии регрессии и накопление материала на последующих стадиях повышенного стояния уровня моря привели к формированию первой террасы, состоящей из геологических тел разного возраста. Размыв останцов ЛК и прорыв вод в юго-восточном направлении по Быковской протоке произошел уже после образования первой террасы около 1500 лет назад.

Дельта р. Лены является чрезвычайно динамично развивающейся формой рельефа, образованной в результате колебаний уровня моря и перекоса земной поверхности, являющегося следствием неравномерных тектонических движений. Переформирование стока в протоках дельты, изменение очертаний русловой сети происходят на глазах исследователей.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках российско-германских экспедиций «Лена-2013», «Лена-2014», «Лена-2015» и «Лена-2018». Авторы выражают благодарность в поддержке исследований Институту полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера (Германия) и лично его сотруднику Вальдемару Шнайдеру. Исследования поддержаны грантами РФФИ 18-05-70091 «Ресурсы Арктики, оценка темпов разрушения арктических берегов, объемов терригенного материала и органического углерода, поступающего в Арктический бассейн» (2018–2020) и 18-45-140057 «Темпы деградации подводной мерзлоты и дополнительные потоки газов из донных толщ в атмосферу в арктической зоне Якутии (мелководный шельф, лагуны, прибрежные озера, русла проток в устьевых зонах) в условиях современных климатических флуктуаций» (2018–2020).

Acknowledgements. The study was conducted during the Russian-German expeditons “Lena-2013”, “Lena-2014”, “Lena-2015” and “Lena-2018”. The authors are grateful to the Alfred Wegener Institute and particularly to Waldemar Schneider for the support in the research. The investigation is supported by Russian Foundation for Basic Research grants 18-05-70091 and 18-45-140057.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев М.Н. Криоморфогенез устьевой области р. Лены. Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 1993. 176 с.
2. Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.
3. Топографическая карта Генштаба. Масштаб 1:200000. СССР, РСФСР, Якутская АССР. Военно-топографическое управление Генерального штаба СССР. 1987 г.
4. ArcticDem. Available at: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (accessed 13.06.2019).
5. Арсланов Х.А. Радиоуглерод: геохимия и геохронология. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1987. 300 с.
6. Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafliðason H., Hajdas I., Hatt C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen, K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R. A., Turney C.S.M., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0-50,000 Years cal BP // Radiocarbon. 2013. V. 55. № 4. P. 1869–1887.
7. Коротаев В.Н. Формирование гидрографической сети Ленской дельты в голоцене // Вестник Московского университета. Серия географическая. 1984. № 6. С. 39–44.
8. Molodkov, A., Bitinas, A. Sedimentary record and luminescence chronology of the Lateglacial and Holocene aeolian sediments in Lithuania // Boreas. 2006. V. 35. P. 244–254.
9. Chetverova A., Skorospekhova T., Morgenstern A., Alekseeva N., Spiridonov I., Fedorova I. Hydrological and hydrochemical characteristics of lakes in the Lena River delta (Northeast-Siberia, Russia) // Polarforschung. 2017. V. 2 (87). P. 111–123.
10. Кандрюкова Н.А. Геоморфологическая и линеamentная структура дельты реки Лены по материалам дистанционной съемки // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2014. № 1. С. 169–176.
11. Ашик И.М., Большиянов Д.Ю., Макаров А.С. Развитие берегов Российской Арктики в связи с колебаниями уровня моря // Метеоспектр. 2010. № 2. С. 23–27.

REFERENCES

1. Grigoriev M.N. Kriomorfogenez ust'evoi oblasti r. Leny. Cryomorphogenesis of the Lena River mouth area. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SBRAoS, 1993:176 p. [In Russian].
2. Bolshiyarov D.Yu., Makarov A.S., Schneider W., Shtof G. Proiskhozhdenie i razvitie del'ny reki Leny. Origination and evolution of the Lena River Delta. St. Petersburg: AARI, 2013: 268 p. [In Russian].
3. Topograficheskaya karta Genshtaba. Masshtab 1:200000. Topographical map of General Staff. Scale 1:200000. USSR, RSFSR. Yakutian ASSR. Military Topographical Directorate of the General Staff of the USSR. 1987.
4. ArcticDem. Available at: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (accessed 13.06.2019).
5. Arslanov H.A. Radiouglerod: geokhimiya i geokhronologiya. Radiocarbon: geochemistry and geochronology. Leningrad: Leningrad University establishment, 1987: 300 p. [In Russian].
6. Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafliðason H., Hajdas I., Hatt C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hugh-

en, K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Staff R. A., Turney C.S.M., van der Plicht J. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. Radiocarbon. 2013, 55: 1869–1887.

7. Korotaev V.N. Formation of the Lena delta hydrographic net in Holocene. *MSU Vestnik. Journal of Moscow State University. Geographic series.* 1984, 6: 39–44. [In Russian].

8. Molodkov A., Bitinas A. Sedimentary record and luminescence chronology of the late glacial and Holocene aeolian sediments in Lithuania. *Boreas*, 2006, 35: 244–254.

9. Chetverova A., Skorospekhova T., Morgenstern A., Alekseeva N., Spiridonov I., Fedorova I. Hydrological and hydrochemical characteristics of lakes in the Lena river delta (Northeast-Siberia, Russia). *Polarforschung.* 2017, 2 (87): 111–123.

10. Kandryukova N.A. Geomorphological and linear structure of the Lena river delta, based on remote data sensing. *Vestnik of St. Petersburg State University. Journal of St. Petersburg State University. Series 7. Geology. Geography.* 2014, 1: 169–176. [In Russian].

11. Ashik I.M., Bolshiyarov D. Yu., Makarov A.S. Shoreline development of Russian Arctic according to a sea level fluctuations. *Meteospectr. Meteospectrum*, 2010, 2: 23–27. [In Russian].