УДК 528.8:551 **DOI: 10.35595/2414-9179-2019-2-25-161-174**

В.И. Кравцова[1], **А.Н. Инюшин**[2]

ПРИРОДНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ДЕЛЬТЫ ЛЕНЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЕЁ МОРСКОГО КРАЯ

АННОТАЦИЯ

История формирования дельты Лены в позднем голоцене хорошо изучена палеогеографическими методами. Попытки исследования динамики современной дельты по разновременным топографическим картам и аэрофотоснимкам за период 1950–1991 годов показали отсутствие изменений. В настоящей работе выполнено исследование динамики морского края дельты за временной интервал с конца XX века по настоящее время по космическим снимкам, главным образом, со спутника Landsat. При большой протяжённости морского края дельты более чем на 1 500 км и её сложном строении характер берегов неодинаков и динамические процессы на разных участках могут быть различными. Учитывая это, для исследования динамики морского края мы выполнили природное районирование дельты на основе топографических и геоморфологических карт и космических снимков, принимая во внимание морфологию речных рукавов дельты, их ширину и густоту сети, характер их устьев, рельеф поверхности дельты, растительный покров и ландшафты в целом. На основе этого районирования морской край дельты был разделен на 7 участков и изменения исследовались для каждого из них. Из-за сложных погодных условий, необходимости в безоблачных снимках на конец лета, временной период исследования для отдельных участков был не одинаков. В результате анализа разновременных снимков на 97 % протяженности морского края дельты изменения не были обнаружены, но для 3 % выявлены изменения и составлены карты динамики. В западной части дельты Лены в устье Оленёкского рукава, где ранее сформировалась небольшая локальная дельта выдвижения, в 1980–2003 годах происходил размыв морского края и отступание берега со скоростью 20–30 м/год. Мелководья вокруг этой дельты также размывались и материал размыва переносился вдольбереговым течением. В северной части дельты, вблизи устьев Туматских проток обнаружено неустойчивое положение береговой линии с чередованием её выдвижения и отступания, а в северо-восточной части дельты на небольшом прямолинейном участке берега зафиксирован его размыв со среднегодовым отступанием в 2005–2016 годах 15–30 м/год. Все обнаруженные изменения относятся к участкам выхода к морю рукавов, получающих меньшую долю стока Лены. У выхода рукавов с наибольшим водным стоком, так же как на участке включённой в дельту морской террасы, изменений не произошло. Нигде не обнаружено выдвижение дельты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дельта, динамика, космические снимки, размыв, аккумуляция

---

[1] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: **valentinamsu@yandex.ru**
[2] Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: **stormy94@mail.ru**

Valentina I. Kravtsova[1], **Aleksandr N. Inyushin**[2]

NATURAL ZONING OF THE DELTA OF LENA RIVER FOR THE RESEARCH OF THE DYNAMICS OF ITS SEA EDGE

ABSTRACT

History of the delta of Lena River forming in Last Holocene had been clear investigated by pale geographical methods. Undertaking of modern delta dynamics investigation by multitemporal topographic maps and air photos for 1950–1991 had shown the absence of changes. In this work we have created investigation of delta's sea edge changes for the next time interval from the end of XX century to recent time by space images, mainly from Landsat satellite. At big prolongation of delta's sea edge for more than 1500 km and its complex construction, shores have various character and dynamic processes at various sections may be different. To take it in account, for investigation of delta's sea edge dynamics, we have created the division of delta surface into natural regions at the base of topographic and geomorphologic maps and satellite images, taking attention to morphology of river branches – their wideness and density of network, character of their mouths, relief of delta surface, vegetation cover and landscapes at whole. In connection with this regionalization the delta sea edge was divided into 7 sections, and changes had been investigated for every of them. Because of weather conditions and necessity of images without clouds for the end of summer, time interval for investigations in different sections was various. As result of multitemporal images analyzing at 7 sections for 97 % of delta's sea edge changes were not discovered, but for 3 % changes were investigated and maps of delta dynamics were compiled. In the Western part of the delta of Lena River, at mouth of Olenyok branch, where small local protruding delta was formed, in 1980–2003 erosion of sea edge took place and shore line retreat with middle year velocity 20–30 m/year. Shallows around this delta also eroded and sediments were moved with alongshore stream. In the Northern part of the delta, near mouths of Tumatskie branches, unstable position of shore line was discovered with alternation of it seaward and landward moving. At the Northern-Eastern part of the delta, at small rectilinear section of shore, its erosion in 2005–2016 was fixed with middle year retreat 15–30 m/year. All discovered changes are connected with mouths of branches, taking the lesser share of the Lena River water runoff. At regions with mouths of branches, taking the most part of water run off, there are no changes, so as at shore of sea terrace, included into delta. Delta protruding was not found anywhere.

KEYWORDS: delta, dynamics, satellite images, erosion, accumulation

ВВЕДЕНИЕ

Дельта Лены – крупнейшая в России (и вторая по величине после Миссисипи в мире), площадью около 30 тыс. км^2, за последние 5–7 тыс. лет (во второй половине голоцена) выдвинулась в море Лаптевых на 120–150 км. За это время наносы реки заполнили образовавшийся в максимальную фазу послеледниковой трансгрессии приустьевой залив, причленив к суше крупный островной участок абразионной морской террасы и острова едомы – приморской равнины, сложенной ледовым комплексом [Эстуарно-дельтовые…, 2007]. Это определило сложное морфологическое строение дельты. Аккумулятивный конус её восточной части образован густой сетью радиально расходящихся рукавов – Быковской протоки, ответвляющейся от главного русла на юго-восток, Трофимовской протоки – на восток и северо-восток, Туматской – на север, а также отходящей на запад Оленёкской протоки.

[1] Lomonosov Moscow state University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail*: **valentinamsu@yandex.ru**
[2] Lomonosov Moscow state University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, *e-mail*: **stormy94@mail.ru**

Западная часть дельты между северными и западными рукавами не создана речной аккумуляцией и генетически представляет собой инородное дельте тело – включённую в неё абразионную морскую террасу; таковы же и останцы едомы, сохранившиеся в виде островов между рукавами дельты.

История развития и динамика дельты в позднем голоцене хорошо изучена по российско-германскому проекту «Природная система моря Лаптевых» [Большиянов и др., 2013] и отражена на составленных геоморфологических картах [Коротаев, 2012; 2017]. Однако никаких картографических материалов о современной динамике дельты и её морского края нет.

Попытка количественного определения изменений во второй половине XX века была предпринята сотрудниками российско-германской группы на основе сравнения разновременных топографических карт масштабов 1:200 000, 1:100 000, 1:25 000, аэроснимков 1:30 000–1:70 000 и космических снимков за период 1951–1991 годов на ключевых участках, однако при этом выявить изменения в морфологии и геометрии берегов не удалось [Rachold et al., 2000]. Это свидетельствует об очень малой изменчивости берегов дельты, возможно, о её стабильности в этот период.

Характер и тенденции изменений морского края дельты зависят от типа берегов. Имеющиеся карты типов берегов в работах российско-германской экспедиции [Are, 1998] относят к медленно отступающим термоабразионным берегам побережье западной части дельты, где береговая линия ограничивает абразионную морскую террасу, и к выдвигающимся аккумулятивным берегам – восточную часть дельты с устьями Быковской, Трофимовской, Туматской проток. Близкая картина дана и в Атласе морфодинамики устьевых систем крупных рек Арктического побережья России. Однако более детальная карта типов берегов моря Лаптевых в монографии по геоэкологическому состоянию арктического побережья России [Лукьянова, Соловьёва, 2007] относит берега включённой в дельту абразионной морской террасы к аккумулятивным лагунным (западный край, ограниченный протяжённым баром) и к пляжевым (северный край). Берега остальной части дельты отнесены к аккумулятивным дельтовым. И лишь небольшие участки термоабразионных берегов показаны в местах выхода к морскому краю останцов едомы (ледового комплекса) в районе устья Оленёкской протоки и на полуострове Быковском. Таким образом на протяжении морского края дельты возможны разнонаправленные процессы аккумуляции и абразии; однако разные исследователи неоднозначно указывают участки их распространения.

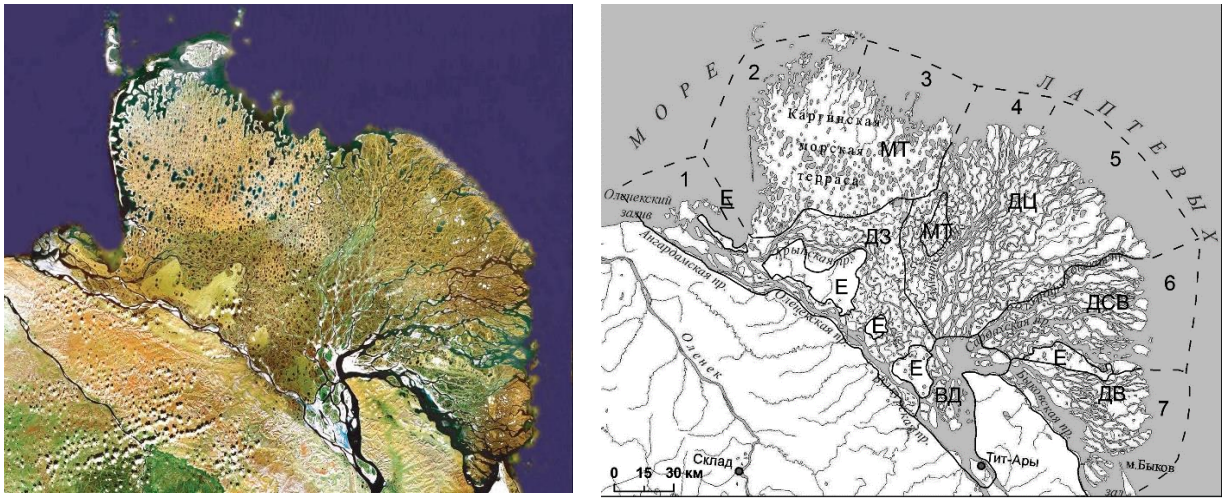
К этой неясности добавляются противоречивые взгляды на аккумуляцию приносимых рекой наносов в дельте. Суммарные потери взвешенных наносов в дельте по данным лаборатории русловых процессов МГУ оценивались в 83–90 % [Alabyan et al., 1995]. В последующих оценках доля осаждаемых наносов уменьшилась. В.Н. Коротаев [2012] считает, что лишь 30 % твёрдого стока Лены выносится в море, а остальной материал аккумулируется в дельте. Однако, по наблюдениям российско-германской экспедиции, отсутствие естественных береговых валов вдоль водотоков в приморской 15–30-километровой зоне дельты, отсутствие перекрытия поверхности грязевыми отложениями, очень чёткое соответствие деталей поверхности на современных снимках и картах 45–50-летней давности свидетельствуют о том, что большая часть приносимых рекой взвешенных наносов достигает моря [Rachold et al., 2000]. На основе анализа мутности речных вод, приведённой к многолетнему периоду, а также с учётом изменения спектральной яркости водной поверхности по космическим снимкам, выполнено уточнение суммарных потерь взвешенных наносов в дельте до величины 40–65 % [Магрицкий и др., 2018].

Попыток выявления динамики морского края дельты после 1991 года не предпринималось. Между тем, качество космических снимков с этого времени улучшилось, на спутниках Landsat используются новые каналы съёмки: канал в среднем инфракрасном диапазоне обеспечивает чёткое разделение воды и суши; канал в ближней синей зоне спектра предназначен для отображения мелководных объектов. С 2000-х годов стали получать

снимки очень высокого – метрового и субметрового разрешения со спутников Ikonos, QuickBird, GeoEye. Это побудило нас попытаться выявить наличие изменений морского края дельты Лены и в случае их обнаружения определить их количественно за следующий временной интервал – с конца XX века до настоящего времени, что и составляет задачу работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Слабая изменчивость дельты требует особо тщательного подбора материалов. Трудности подбора снимков связаны со многими ограничениями. Период после завершения весеннего половодья и до ледостава и покрытия снежным покровом всего один месяц. Получение безоблачных снимков для всей площади дельты за столь малый период проблематично. Приходится выбирать безоблачные фрагменты снимков, используя для разных участков морского края дельты снимки за разные временные интервалы.



а б
a b

Рис. 1. Дельта Лены:
а) Снимок со спутника Landsat 2001;
б) Схема природных районов (буквенные индексы поясняются в статье)
и разделение морского края на участки для исследования динамики
Fig. 1. The Lena River delta:
a) Landsat image 2001;
b) Scheme of nature regions (letter indices are explained in the article)
and division of sea edge into sections to study the dynamics

Наиболее подходящими для исследования представляются имеющиеся в открытом доступе снимки со спутников Landsat 7, 8 с разрешением 30 м для многозональных снимков и 15 м для панхроматических, имеющие важные для дешифрирования береговой зоны каналы. На снимках в ближнем синем канале (0,43–0,45 мкм), благодаря лучшему проникновению солнечных лучей в водную толщу, отображаются отмели. Снимки в среднем инфракрасном канале (2,08–2,35 мкм) обеспечивают чёткое разделение воды и суши. Опробованы также снимки со спутника Sentinel 2A в видимом диапазоне как наиболее походящие по разрешению 10 м, и снимки с этого же спутника в радиодиапазоне, как не зависящие от условий облачности. Но в связи с появлением лишь в 2012 году они используются лишь для более детального анализа современной ситуации, но не для определения изменений. С целью расширения временного интервала исследования на 1980-е годы использованы также

панхроматические снимки высокого разрешения (8 м) с американского разведывательного спутника KeyHole.

Для каждого из 7 исследуемых участков дельты Лены удалось подобрать от 2 до 7 разновременных снимков, и из них необходимо было выбрать наиболее подходящие для исследования динамики. По возможности использовались снимки, полученные в сходных погодных условиях, поскольку даже средний по силе, но устойчивый ветер мог вызвать заметное изменение береговой линии в результате обнажения или погружения под воду участков отмелей. Поэтому для каждого снимка учитывались погодные условия в момент съёмки – направление ветра, его средняя и максимальная скорость, а также устойчивость. В качестве источника перечисленных важных метеорологических данных использовалась автоматизированная информационная система обработки режимной информации (АИСОРИ) ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», где доступен архив погоды по всем метеостанциям России. Для дельты Лены использовалась метеостанция Тикси, как самая ближайшая.

Дельта Лены, огромная по площади, имеет морской край длиной 1 547 км, на протяжении которого характер берегов меняется. Поэтому на первом этапе выполнено природное районирование дельты с выделением районов, в пределах которых можно было ожидать проявления определённых тенденций динамики (рис. 1). В соответствии с этим морской край разделён на 7 участков. Сопоставление разновременных снимков выполнено последовательно на каждом участке по всему морскому краю, но фиксация результатов сопоставления в виде схем динамики потребовала работы в более крупном масштабе 1:100 000 и выполнена для эталонных участков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Природное районирование территории дельты

Природное районирование территории дельты проведено на основании детального анализа космических снимков в информационной системе GoogleEarth, а также с учётом геоморфологических карт дельты Лены, составленных В.Н. Коротаевым [Коротаев, 2012; 2017; Эстуарно-дельтовые…, 2007], схемы геоморфологического строения устьевой области Лены М.Н. Григорьева [1993], геоморфологической карты А.С. Макарова и карты земных покровов дельты, составленной по космическим снимкам в монографии [Большиянов и др., 2013], а также приводимых в этих работах описаний поверхности. При выделении районов учитывался генезис отдельных участков дельты, морфология речных рукавов дельты, их ширина и густота сети, характер устьев, типы и формы рельефа поверхности, развитие рельефообразующих процессов, растительный покров и ландшафты в целом. На схеме (рис. 1 б) выделенные природные районы обозначены буквенными индексами (ВД – вершина дельты; ДЦ – центральная часть дельты; ДСВ, ДВ, ЗД – северо-восточная, восточная и западная части дельты; МТ – морская терраса, включённая в дельту; Е – останцы едомы). Охарактеризуем эти районы.

ВД. Привершинный участок дельты

Распространяется на 50 км ниже первого дельтового разветвления – урочища Тит-Ары, где от основного русла отделяется первый левый рукав – Булкурская протока, теперь имеющая признаки отмирания. Участок включает расширение русла между Хараулахским хребтом, ограничивающим дельту с востока, хребтом Чекановского – с юга и останцом приморской равнины (едомы) – с запада. Основной поток Лены здесь расширяется до 7–8 км. Основная часть района представляет собой преобладающие по площади песчаные отмели и осерёдки, а также дельтовые острова – участки старой дельтовой поймы высотой 5–10 м, незаливаемая поверхность которой закреплена осоковой и мохово-кустарничковой тундровой растительностью и осложнена термокарстовыми западинами; отдельные острова представляют собой фрагменты едомы. Острова разделены густой сетью межостровных проток, которые в межень разобщаются на отдельные плёсы.

ДЦ. Центральная часть дельты

Центральная часть основного дельтового конуса выдвижения в море – конус выноса дельтовых рукавов Туматской протоки и левых рукавов Трофимовской протоки. Район охватывает центральную часть дельтового конуса, ограниченную абразионной морской террасой с запада и протокой Трофимовской с востока. Характерна исключительно густая сеть относительно неширокихсильно ветвящихся рукавов с вытянутыми в северном направлении дельтовыми островами преимущественно молодой поймы высотой до 3 м, ежегодно заливаемой в половодье или при нагонах и паводках, с полигональным крупноячеистым рельефом и водонасыщенной поверхностью с осоковым и моховым растительным покровом. Меньшую площадь занимают острова зрелой дельтовой поймы высотой 3–5 м, с полигонально-валиковым микрорельефом, кустарничковой тундровой растительностью и проявлением термокарстовых процессов – густой сетью небольших термокарстовых озёр. В верхней зоне водотоков этого района широко развиты современные русловые формы, песчаные отмели и осерёдки. Для этого центрального района выдвижения дельты в море характерны небольшие устьевые расширения впадающих в море рукавов и в целом округлый контур дельты выдвижения, иногда с причленёнными морскими формами аккумуляции. Северо-восточная часть морского края дельты в пределах этого района приобретает прямолинейные очертания. В прибрежной полосе суши шириной 5–7 км, согласно последней карте В.Н. Коротаева [2017], заметные площади занимают участки позднеголоценовой морской террасы. Западная часть района включает также останцы абразионной морской террасы, по поверхности которой проложила своё русло Малая Туматская протока.

ДСВ. Северо-восточная часть дельты

Северо-восточная часть основного дельтового конуса выдвижения в море – конус выноса дельтовых рукавов Трофимовской и Сардахской проток. Район ограничивают с севера левая Трофимовская, а с юга Сардахская протока с её правыми ответвлениями и останец едомы. Характерна сеть широких полноводных рукавов с массой мелких островов и осерёдков; рукава заканчиваются в море значительными устьевыми расширениями, представляющими собой арену действия сгонно-нагонных процессов. В приморской зоне шириной 20–30 км сформированы острова молодой (низкой) поймы высотой до 3 м, ежегодно заливаемой в половодье и при нагонах, с переувлажнённым субстратом и полигональным микрорельефом, с поверхностью, слабо закрепленной осоковой растительностью. Выше по течению преобладают острова зрелой поймы высотой 3–5 м и старой незаливаемой поймы высотой 5–10 м, где полигональный рельеф, характерный для молодой поймы, деградирует и широко развиты термокарстовые процессы, распространены термокарстовые озёра и аласные котловины. Эти острова покрыты типичной тундровой мохово-осоковой и кустарничковой растительностью; широко развиты торфяники. В прибрежной зоне моря, расчленённой устьевыми расширениями водотоков, дельта имеет мелколопастной характер, а на устьевом взморье в продолжениях наиболее крупных рукавов, согласно карте В.Н. Коротаева [2012], широко развиты далеко выдвинутые в море устьевые бары.

ДВ. Восточная часть дельты

Восточная часть дельтового конуса – дельта выполнения залива наносами крайнего левого дельтового рукава – протоки Быковской. Район ограничен с севера останцом едомы, а с юга – Приморским кряжем, представляющим собой нижнюю часть северо-восточного склона Хараулахского хребта. Существовавшая здесь к началу голоцена обширная полузамкнутая акватория залива постепенно заполнялась наносами потока, направленного вначале вдоль левобережных обрывов едомы, а потом переместившегося к Приморскому кряжу. В приморской части стали формироваться две многорукавные дельты выдвижения; одна из них, более северная, выдвигалась в существовавший ранее залив, а вторая – в залив Неёлова, где полуостров Быковский блокирует современное устье. Возраст этих дельт по определениям российско-германской экспедиции – 1 500–500 лет [Большиянов и др., 2013]. Соответственно приморские дельтовые острова этого района представляют собой молодую

пойму (по В.Н. Коротаеву – позднеголоценовую аллювиально-морскую дельтовую равнину) высотой до 2 м, ежегодно заливаемую, с переувлажнённым грунтом и осоковым покровом либо лишенную растительности. Выше по течению образовались более высокие (5–10 м) дельтовые острова, представляющие собой надпойменную террасу с термокарстовым рельефом и торфяниками, покрытую мохово-кустарничковой тундровой растительностью. Морской край этого участка дельты включает серию выдвинувшихся в залив островов.

ЗД. Западная часть дельты

Западная часть дельты с протоками Оленёкской и Арынской. Район Арынской протоки, включающий территорию между абразионной морской террасой на севере и останцами едомы на юге, формировался при заполнении заливов между ними 5–4 тысячи лет назад и представляет собой преимущественно старую (высокую) дельтовую пойму – надпойменную террасу высотой 5–10 м с обилием озёр, как пойменных, так и термокарстовых, а также аласов на месте спущенных термокарстовых озёр с байджерахами в котловинах; все эти формы образуют очень густую сеть. Поверхность надпойменной террасы покрыта тундровой мохово-кустарничковой растительностью; в котловинах спущенных термокарстовых озёр – аласах – встречаются торфяники, а вдоль русел водотоков развита мохово-осоковая растительность. Таков же характер растительности вдоль Оленёкской протоки, которая, соединяясь с Арынской, образует в приморской части дельту выполнения эстуарных заливов Арынского и Оленёкского. Бывший долинный залив практически выполнен речными отложениями и несколько проток, впадающих в Оленёкский залив моря Лаптевых, протекают на нижнем 10–15-километровом приморском участке среди массивных песчаных отмелей. На взморье они формируют мелководные устьевые бары.

Е. Останцы едомы

Останцы приморской равнины, сложенной ледовым комплексом, так называемой едомы, оказавшиеся включёнными в дельту благодаря заполнению речными отложениями долинных заливов, происходившему 5–4 тысячи лет назад. Представляют собой возвышающиеся над дельтовыми островами относительно выровненные поверхности высотой 35–45, до 60 м, с мерзлотным микрорельефом и густой сетью солифлюкционного и эрозионного расчленения, с отдельными крупными термокарстовыми озёрами и аласами с байджерахами. Поверхность покрыта влажной травянистой и моховой тундровой растительностью. Дельтовых водотоков на поверхности едомных останцов нет, но они сами образуют в дельте острова суши между омывающими их водотоками. К морскому краю дельты едомные останцы не выходят, за исключением небольшого участка побережья Оленёкской дельты и берегов полуострова Быковского юго-восточнее дельты.

МТ. Морская терраса, включённая в дельту

Морская абразионная терраса высотой 20–22 м, оказавшаяся включённой в контур дельты благодаря заполнению речными отложениями долинных заливов 5–4 тысячи лет назад. В работах В.Н. Коротаева она называется каргинской морской абразионной террасой, у других авторов принято, как и на топографических картах, название о. Арга-Муора-Сисе. Характерную особенность поверхности составляет густая сеть овальных термокарстовых озёр и аласов, чётко ориентированных в северном направлении по продольным ложбинам. Песчаная поверхность морской террасы слабо освоена растительностью – сухой мохово-осоково-кустарничковой тундровой; встречается кочкарная тундра.

Г. Горное окружение дельты

Дельту окружают структурно-денудационные низкие горы с кустарничковой тундровой растительностью.

О. Острова

Помимо охарактеризованных природных геосистем, в дельту оказались включёнными отдельные острова, представляющие собой останцы коренных пород (о-ва Столб, Америка-Хайя и др.).

Изменения участков морского края дельты

Для анализа динамики морского края дельты, который при значительной протяженности входит в различные по генезису, возрасту, преобладающим процессам районы дельты, на основе выполненного природного районирования береговая линия разделена на генетически однородные участки, в пределах которых можно ожидать определённых тенденций развития берега и различных типов динамики. На протяжении морского края дельты выделено 7 участков, показанных на рис.1 б и пронумерованных с запада на восток.

1. Юго-западный участок № 1, приустьевая область Оленёкской и Арынской проток. Эти протоки, соединяясь, образуют дельту выполнения Оленёкского эстуарного залива, восточная часть которого носит название залива Куба (рис. 2 а). По морфологическим признакам в приустьевой области проявляется отложение наносов (1) и можно было бы ожидать нарастания дельтовых островов (2) и выдвижения этой части дельты в море. Однако при сравнении разновременных снимков 1980–2015 годов, напротив, обнаружен размыв выступающих в море отмелых островов с отступанием береговой линии на 500–700 м (рис. 2 б). Учитывая, что размыв произошёл фактически за период 1980–2003 годов, среднегодовая скорость отступания составила 20–30 м в год). Материал размыва образует отмели (3 на рис. 2 а) и переносится вдольбереговым течением в залив Куба; шлейф выноса за эти годы расширился и переместился к востоку на 500–600 м (рис. 2 в). Таким образом, на небольшом участке Оленёкской дельты сосредоточены процессы размыва и аккумуляции материала. В северной части этой дельты на небольшом протяжении к берегу выходит останец едомы (ледового комплекса) (4 на рис. 2 а), где можно было бы ожидать развития термоабразии и отступания берега. Однако никаких изменений здесь не произошло.

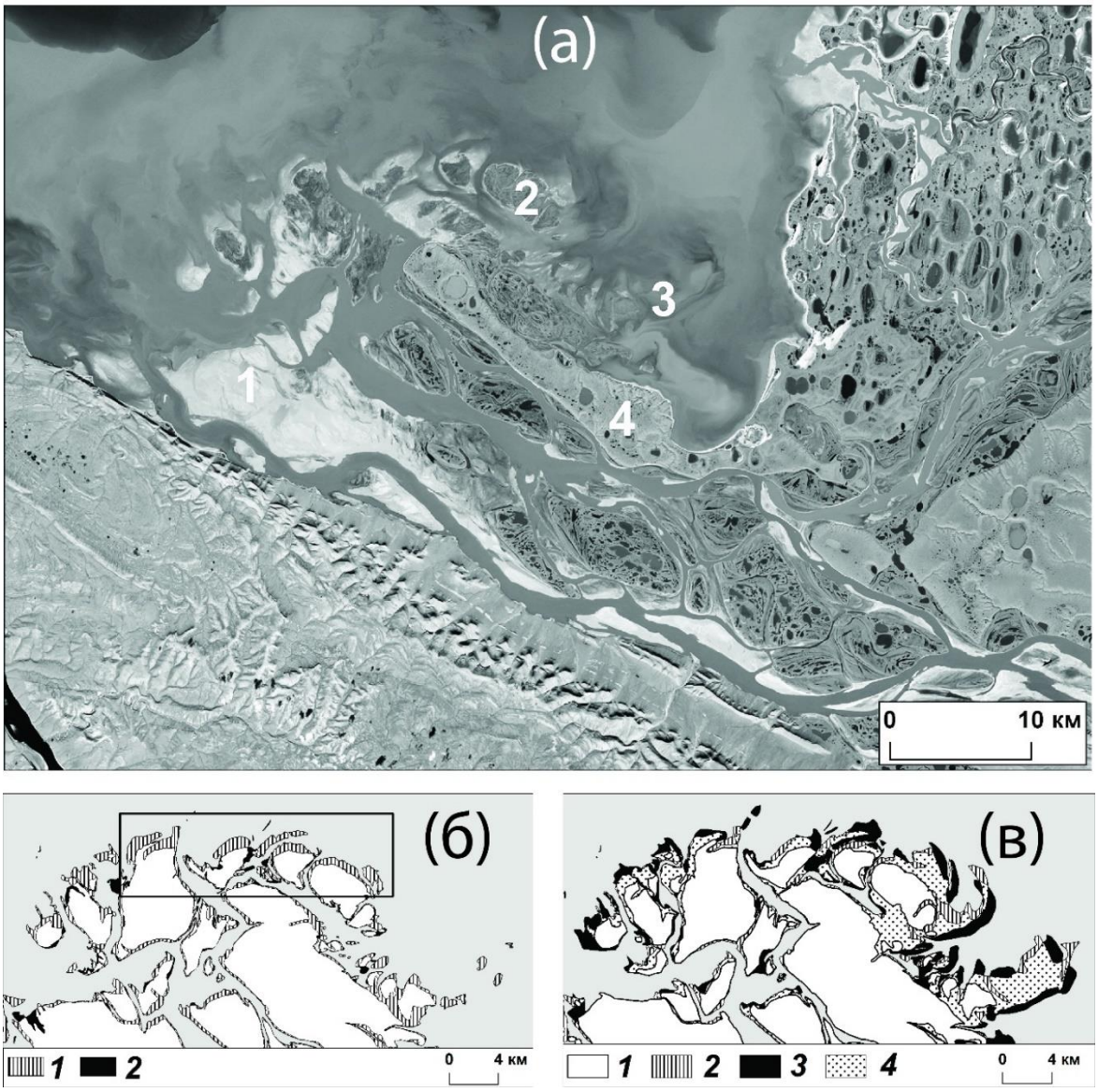
2. Западный участок № 2 (рис. 3), где в пределы дельты включён останец морской абразионной террасы с термокарстовым рельефом, дельтовых водотоков нет и действуют не речные, а морские процессы. Дельту окаймляет вдольбереговой бар, отчленяющий лагуну с изрезанным внутренним берегом, на котором термокарстовые котловины превратились в овальные заливы. За баром со стороны суши тянется песчаная отмель шириной 1–2 км; широкие (500 м) песчаные пляжи окаймляют и заливы, и выступы лагунного берега. Несмотря на наличие легко перемещаемого материала, образовавшийся здесь рельеф оказывается весьма стабильным. Ранее было зафиксировано неизменное положение берегового бара за 1969–2001 годы [Grigoriev et al., 2002]. Выполненное нами сравнение космических снимков за 2000–2017 годы также не выявило изменений на этом участке.

3. На северо-западном участке № 3, также относящемся к останцу морской абразионной террасы и расчленённом ингрессионными заливами, образовавшимися по понижениям с термокарстовыми озёрами, изменений тоже не выражено. Стабилизации морского края способствует быстрое современное промерзание накапливающихся в береговой зоне отложений [Григорьев, 1993].

4. Для северного участка № 4 – Туматской части дельтового конуса – характерен округлый выпуклый контур дельты с причленёнными морскими формами аккумуляции, направленными вдоль берега. На снимках за разные годы эти формы то появляются, то исчезают, меняя положение береговой линии. В исследуемый период наблюдалось и выдвижение береговой линии более чем на 100 м, и её отступание до 450 м. Это связано с влиянием сгонно-нагонных ветров и состоянием моря в момент получения снимков, но не отражает долговременной динамики дельты.

5. Северо-восточный участок № 5 – область развития левых рукавов Трофимовской протоки, с менее густой по сравнению с остальной дельтой сетью относительно неширокиx рукавов. Этот участок морского края дельты прямолинеен и ориентирован с СЗ на ЮВ так же, как и вдольбереговой поток наносов. Некоторые исследователи [Большиянов и др., 2013] считают, что прямолинейность этого участка берега указывает на его абразионный характер и срезание берега вдольбереговым течением. При сравнении береговой линии этого района в 2005 и 2016 годах, действительно, обнаружен небольшой размыв берега на

локальном участке морского края протяжённостью 5–10 км (рис. 4). Береговая линия отступила здесь на 150–300 м; среднегодовое отступание составляет 15–30 м/год.



a

b c

Рис. 2. а) Локальная Оленёкская дельта в западной части дельты Лены (участок №1) на снимке со спутника Landsat (цифры поясняются в тексте). Рамкой выделена часть дельты, в которой выполнены количественные определения динамики
б) Динамика Оленёкской дельты за 1980–2015 годы: 1 – размыв; 2 – прирост дельты
в) Динамика отмелей вокруг Оленёкской дельты: 1 – границы дельты; 2 – размыв отмелей; 3 – нарастание отмелей; 4 – поверхность сохранившихся отмелей
Fig. 2. a) Local Olenyok delta at the Western part of the Lena River delta (section No 1) in the Landsat satellite image (the numbers are explained in the paper). The frame highlights a part of the delta in which quantitative determinations of the dynamics are made
b) Dynamics of Olenyok delta for 1980–2015: 1 – erosion; 2 – accumulation
c) Dynamics of shallows around Olenyok delta: 1 – delta's boundaries; 2 – shallows erosion; 3 – shallows accumulation; 4 – surface of the preserved shallows

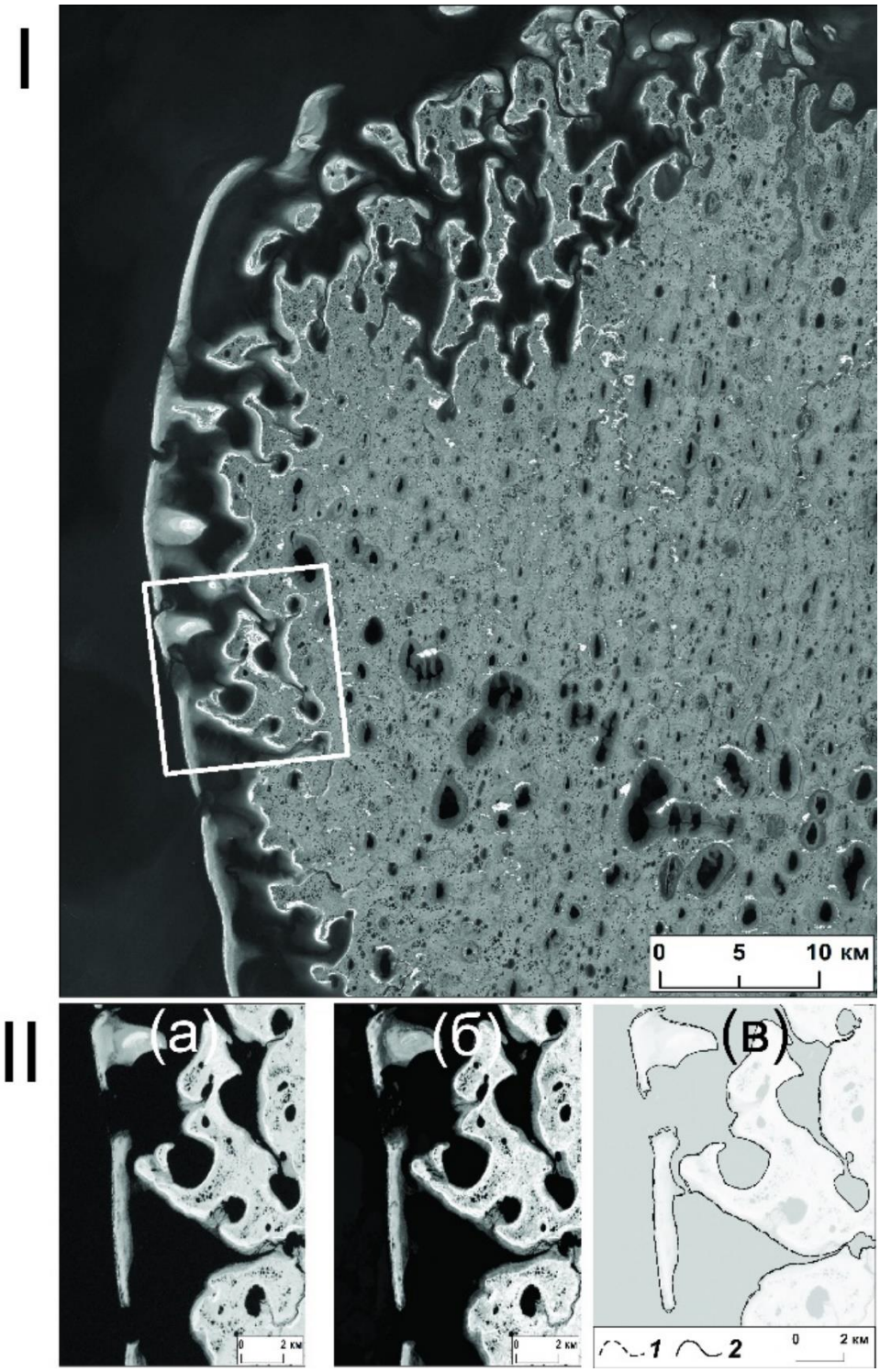


Рис. 3. I. Западный берег морской террасы Арга-Муора-Сисе (участок № 2) на снимке со спутника Sentinel
II. Фрагменты участка на снимках со спутника Landsat:
а) 2001; б) 2017; в) береговые линии за эти годы
Fig. 3. I. The Western shore of sea terrace Arga-Muora-Sise (section No 2) at Sentinel image
II. Fragments of the section in the Landsat satellite image:
a) 2001; b) 2017; c) shorelines over these years

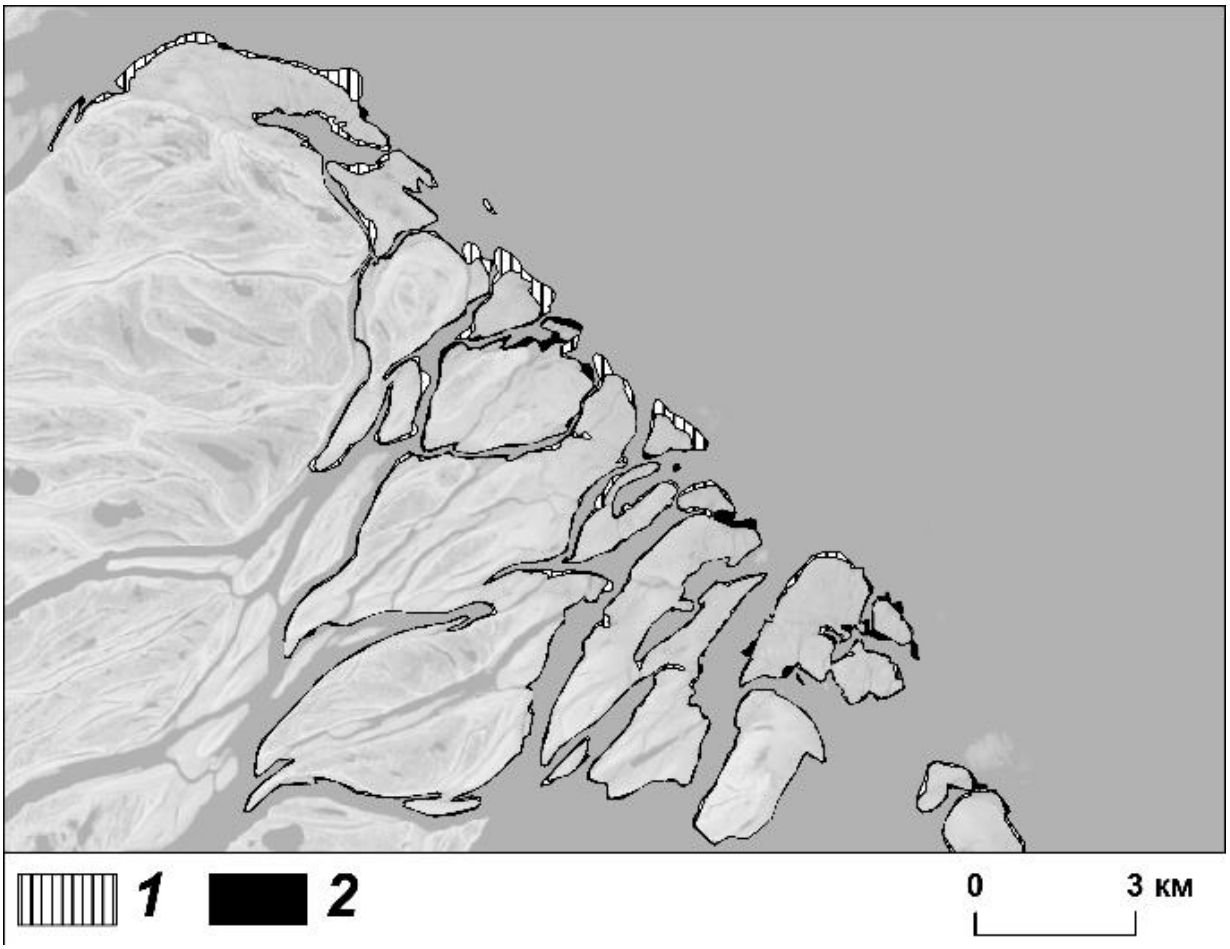


Рис. 4. Северо-восточная часть дельты Лены с устьями рукавов Трофимовской протоки (участок № 5). Динамика небольшого участка за 2005–2016 годы:
1 – размыв; 2 – аккумуляция
Fig. 4. The Northern-Eastern part of the Lena River delta with the mouths of the sleeves of the Trofimovskaya channel (section No 5). Dynamics of small area for 2005–2016:
1 – erosion; 2 – accumulation

6. Восточная часть дельты Лены – участок № 6 между устьями Трофимовской и Сардахской проток, наиболее широких и многоводных, поглощающих до 65 % стока Лены. Береговая линия этого участка значительно изрезана устьевыми расширениями рукавов и дельтовыми лопастями между ними. Несмотря на сильную изрезанность, положение береговой линии в многолетнем плане за исследуемый период неизменно, участок стабилен.

7. Юго-восточная часть дельты – участок № 7 – арена действия рукавов многоводной Быковской протоки, принимающей на себя 25,1 % стока Лены [Магрицкий и др., 2018]. Быковская протока заполнила своими наносами существовавший в начале голоцена залив, а после поворота русла в южном направлении продолжает заполнение современного залива Неёлова, отгороженного полуостровом Быковским [Коротаев, 2012]. При анализе разновременных космических снимков важно было проверить, продолжается ли выдвижение этой части дельты в условиях потепления климата и подъёма уровня моря. Однако оказалось, что этот участок очень стабилен; за 43 года существенных изменений в положении береговой линии не зафиксировано. Очевидно, большой объём стока при достаточно высоких скоростях течения не способствует отложению наносов в береговой зоне и морской край дельты оказывается неизменившимся.

ВЫВОДЫ

Таким образом, несмотря на характерную для арктических побережий в условиях потепления активизацию абразионных процессов (за счёт развития термоабразии и термоденудации на берегах, сложенных ледовым комплексом), крупнейшую в России дельту Лены отличает высокая стабильность. На большей части её морского края изменений с конца XX в. по настоящее время не произошло. Большой объём стока воды приводит к преобладанию воздействия речных факторов над морскими при формировании ее дельты.

Участки морского края дельты вблизи устьев многоводных Трофимовской и Быковской проток, получающих 62,3 % и 25,1 % стока соответственно [Магрицкий и др., 2018], оставались в исследуемый временной интервал неизменными. Не обнаружено изменений и на морском крае причленённой к дельте абразионной морской террасы Арга-Муора-Сисе. Эти стабильные участки берега дельты Лены составляют 97 % протяжённости её морского края.

В то же время неравномерность распределения стока по рукавам дельты обусловливает наличие небольших изменений на 3 % морского края дельты, то есть на протяжении 46 км. Эти изменения относятся к районам устьев рукавов, получающих минимальную долю стока Лены – Оленёкской (6,4 %) и Туматской (6,2 %) проток.

В западной части дельты, в устье Оленёкской протоки хорошо выражены формы аккумуляции, выдвинувшие в прошлом частную Оленёкскую дельту в залив на 10–15 км. С 1980-х годов выдвижения не происходило, и напротив, снимки свидетельствуют о небольшом размыве морского края, отступании береговой линии на 500–700 м за 1980–2003 годы со скоростью 20–30 м/год, с одновременным перемещением продуктов размыва вдольбереговыми течениями в восточном направлении, в залив Куба, образованием там отмелей и их последующим расширением и перемещением к берегу.

В северной части дельты, в районе устьев Туматской протоки, на выпуклом участке берега с причленёнными морскими формами с 2000 года наблюдалось неустойчивое положение этих форм, их появление на поверхности и погружение под воду, с колебаниями положения береговой линии на 100–400 м; возможно, такое чередование происходило в зависимости от изменений объёма стока. На прямолинейном северо-восточном участке берега наблюдается размыв вдольбереговым течением узкой полосы берега на протяжении 10 км с отступанием береговой линии на 150–300 м за 2005–2016 годы со среднегодовой скоростью 15–30 м/год.

Таким образом, все выявленные минимальные изменения связаны с относительно слабым размывом на небольших отрезках берега или неустойчивым положением локальных участков и нигде не обнаружено приращения дельты.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке РФФИ; проекты № 16-05-00288, № 18-05-60221.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by RFBR; projects No 16-05-00288, No 18-05-60221.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г.* Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ (Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт), 2013. 268 с.

2. *Григорьев М.Н.* Криоморфогенез устьевой области р. Лены. Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 1993. 176 с.

3. *Коротаев В.Н.* Дельтовая система Лены. Атлас: Морфодинамика устьевых систем крупных рек Арктического побережья России. М.: Географический факультет МГУ, Институт океанологии РАН, 2017. С.111–116.
4. *Коротаев В.Н.* Очерки по геоморфологии устьевых и береговых систем. Избранные труды. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 540 с.
5. *Лукьянова С.А., Соловьёва Г.Д.* Берега Карского моря и моря Лаптевых. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования. М.: ГЕОС, 2007. С. 492–495.
6. *Магрицкий Д.В., Айбулатов Д.Н., Горелкин А.В.* Закономерности пространственно-временной изменчивости стока на предустьевом участке и в дельте р. Лены. Водные ресурсы, 2018. Т. 45. № 1. С. 15–29.
7. Эстуарно-дельтовые системы России и Китая. Гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития. М.: ГЕОС, 2007. 445 с.
8. *Alabyan A.M., Chalov R.S., Korotaev V.N., Sidorchuk A.Yu., Zaitsev A.A.* Natural and technogenic water and sediment supply to the Laptev sea. Berichte zur Polarforschung, 1995. No 176. P. 265–271.
9. *Are F.E.* The contribution of shore thermoabrasion to the Laptev Sea sediment balance. Permafrost Seventh International Conference (Proceedings). Yellowknife (Canada): Collection Nordicana, 1998. No 55. P. 25–30.
10. *Grigoriev M.N., Are F.E., Hibberten H.-W., Rasumov S.O., Schneider W.* Pecularities of coastal processes and shoreline dynamics of the accumulative-erosive coastal system in the north-west of the Lena Delta. Ber. Polar und Meeresforsch, 2002. No 426. P. 64–70.
11. *Rachold V., Grigoriev M., Are F., Solomon S., Reimnitz E., Kassens H., Antonow M.* Coastal erosion vs riverine sediment dischardge in the Arctic Shelf seas. International Journal of Earth Sciences, 2000. V. 89. P. 450–460.

REFERENCES

1. *Alabyan A.M., Chalov R.S., Korotaev V.N., Sidorchuk A.Yu., Zaitsev A.A.* Natural and technogenic water and sediment supply to the Laptev sea. Berichte zur Polarforschung, 1995. No 176. P. 265–271.
2. *Are F.E.* The contribution of shore thermoabrasion to the Laptev Sea sediment balance. Permafrost Seventh International Conference (Proceedings). Yellowknife (Canada): Collection Nordicana, 1998. No 55. P. 25–30.
3. *Bolshiyanov D.Yu., Makarov A.S., Shnaider V., Shtof G.* Origin and development of the Lena River delta. St. Peterburg: AARI (Arctic and Antarctic Research Institute), 2013. 268 p. (in Russian).
4. Estuarine-deltaic systems of Russia and China: hydrological-morphological processes, geomorphology and prediction of evolution. Moscow: GEOS, 2007. 445 p. (in Russian).
5. *Grigoryev M.N.* Cry morphogenesis of the Lena River mouth area. Yakutsk: Institute of Permafrost SO RAS, 1993. 176 p. (in Russian).
6. *Grigoriev M.N., Are F.E., Hibberten H.-W., Rasumov S.O., Schneider W.* Pecularities of coastal processes and shoreline dynamics of the accumulative-erosive coastalsystem in the north-west of the Lena Delta. Ber. Polar und Meeresforsch, 2002. No 426. P. 64–70.
7. *Korotaev V.N.* Delta system of the Lena River. Morphodynamic of large rivers mouths systems of Russia Arctic coasts. Moscow: MSU, Faculty of Geography, Institute of Oceanology of RAS, 2017. P. 111–116 (in Russian).
8. *Korotaev V.N.* Essays of geomorphology of river mouth and coastal systems. Selected Works. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2012. 540 p. (in Russian).
9. *Lukyanova S.A., Solovyova G.D.* Shores of the Kara Sea and the Laptev Sea. Geoecological statement of the Russia Arctic coasts and safe nature using. Moscow: GEOS, 2007. P. 492–495 (in Russian).

10. *Magritskyi D.V., Aybulatov D.N., Gorelkin A.V.* Peculiarities of space-time run-off changeability at near mouth area and in the Lana River delta. Water Resources, 2018. V. 45. No 1. P. 15–29 (in Russian).
11. *Rachold V., Grigoriev M., Are F., Solomon S., Reimnitz E., Kassens H., Antonow M.* Coastal erosion vs riverine sediment dischardge in the Arctic Shelf seas. International Journal of Earth Sciences, 2000. V. 89. P. 450–460.