

Geoинформатика. 2022. № 1. С. 17–31.
Geoinformatika. 2022;(1):17–31.

Применение ГИС-технологий

Научная статья
 УДК 556.54:528.8
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2022-1-17-31>

Методика исследований динамики дельт приливных северных рек по космическим снимкам (на примере Северной Двины)

© 2022 г. — В.И. Кравцова^{1,а)}, О.В. Вахнина^{1,б)}, С.В. Лебедева^{2,с)}, Е.Г. Харьковец^{1,д)}, Е.Р. Чалова^{1,е)}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Россия, Москва

²Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды; Россия, г. Архангельск

^{а)}valentinamsu@yandex.ru, ^{б)}vachnina-ov@yandex.ru, ^{с)}hydrosima@gmail.com, ^{д)}e_x@geogr.msu.ru, ^{е)}ekar28@yandex.ru

Аннотация: По космическим снимкам со спутников KeyHole 1977 г. и Sentinel-2B 2020 г. исследована динамика приливной дельты р. Северной Двины. При выборе снимков необходим учет сезонных и приливных колебаний уровня воды; отобраны снимки на период межени с близкой фазой прилива в моменты съемки в разные годы. Впервые составленная карта динамики дельты за период 1977–2020 гг. показывает, что продолжается отмечавшееся исследователями и ранее нарастание дельты — присоединение к ней островов вдоль морского края, аккумуляция отложений и увеличение площади русловых островов в основных рукавах, сужение и исчезновение мелких водотоков на островах дельты. Но к долговременной тенденции роста дельты добавляются процессы размыва берегов островов морского края со стороны Двинского залива.

Ключевые слова: дельта, динамика, аккумуляция, размыв, приливные колебания уровня

Для цитирования: Кравцова В.И., Вахнина О.В., Лебедева С.В., Харьковец Е.Г., Чалова Е.Р. Особенности методики исследований динамики дельт приливных рек северных районов по космическим снимкам (на примере Северной Двины) // *Geoинформатика*. — 2022. — № 1. — С. 17–31. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2022-1-17-31>.

Application of GIS-technologies

Original article

Features of the methodology for studying the dynamics of tidal rivers deltas in the northern regions using satellite images (the Northern Dvina as example)

© 2022 — V.I. Kravtsova^{1,а)}, O.V. Vachnina^{1,б)}, S.V. Lebedeva^{2,с)}, E.G. Charkovets^{1,д)}, E.R. Chalova^{1,е)}

¹Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia

²Northern Agency for Hydrometeorology and Environmental Monitoring; Arkhangelsk, Russia

^{а)}valentinamsu@yandex.ru, ^{б)}vachnina-ov@yandex.ru, ^{с)}hydrosima@gmail.com, ^{д)}e_x@geogr.msu.ru, ^{е)}ekar28@yandex.ru

Abstract: Using satellite images from the KeyHole 1977 and Sentinel-2B 2020 satellites, the dynamics of the tidal delta of the Northern Dvina River was investigated. When choosing images, it is necessary to take into account seasonal and tidal fluctuations in the water level; images for the dry season with a close tide phase at the moments of shooting in different years were selected. The first compiled map of delta dynamics for the period 1977–2020 shows that the growth of delta, noted by researchers earlier, continues — the attachment of islands along the sea edge to it, the accumulation of sediments and an increase in the area of channel islands in the main river-branches, narrowing and disappearance of small streams on the delta islands. But to the long-term tendency of delta growth, the processes of erosion of the coast on the islands of the sea edge are added from the side of the Dvina Bay.

Key words: delta, dynamics, accumulation, erosion, tidal level fluctuations

For citation: Kravtsova V.I., Vachnina O.V., Lebedeva S.V., Charkovets E.G., Chalova E.R. Features of the methodology for studying the dynamics of tidal rivers deltas in the northern regions using satellite images (the Northern Dvina as example). *Geoinformatika*. 2022;(1):17–31. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2022-1-17-31>. In Russ.

Введение

Дельты северных рек, представляющие замыкающие звенья на пути водного транспорта к океану, привлекают внимание современных исследователей в связи с возобновлением при потеплении климата Северного морского пути. Северная Двина — одна из наиболее хозяйственно освоенных и урбанизиро-

ванных дельт мира, служившая морскими воротами России с допетровских времен. Здесь находится один из крупнейших портов Европы — Архангельск. Рукава дельты, в связи с их активным транспортным использованием, многократно картографировались. Исторические картографические материалы за последние 350 лет детально проанализированы

[3], однако, никогда не было создано карты динамики дельты, ее изменений со временем. Задача настоящей работы — составление карты, характеризующей многолетнюю динамику дельты, которая отражала бы современные тенденции ее развития. Она решается на основе получаемых с 1970-х гг. материалов космической съемки, имеющих достаточное пространственное разрешение. Осложнения при сопоставлении разновременных снимков связаны с сильной межгодовой и сезонной изменчивостью уровня воды, стонно-нагонными и систематическими приливно-отливными явлениями.

Характеристика района исследований

Северная Двина — одна из крупных рек европейской части России, с объемом водного стока на замыкающем створе Усть-Пинега $104 \text{ км}^3/\text{год}$ [9] и стоком взвешенных наносов 4,5 млн т/год [10]. Образованная слиянием рек Сухона и Юг на севере Восточно-европейской равнины, река впадает в Двинскую губу Белого моря, формируя много рукавную приливную дельту выдвигения площадью 893 км^2 [10], ее ширина вдоль морского края 45 км, а длина главного рукава 42 км (рис. 1). Устьевая область, включающая открытое приглубое устьевое взморье, относится к дельтово-эстуарному типу [11].

Дельта Северной Двины сформировалась в процессе заполнения речными наносами эстуария, существовавшего с бореального времени (раннего голоцена), и приобрела современный облик, когда уровень Белого моря стабилизировался [10]. Вершина дельты находится вблизи центра города Архангельска, откуда веерообразно расходятся основные рукава Никольский, Мурманский, Корабельный и Маймакса (рис. 1).



Перед выходом к взморью, рукава образуют три устьевых расширения — Пудожемское, Мурманское и Корабельное. Основной судовой ход проходит в настоящее время по восточному рукаву Маймакса, а в Корабельном устьевом расширении судовой ход продолжается по проложенному в нем Морскому каналу.

По гидрологическому режиму Северная Двина относится к рекам со снеговым питанием и весенним половодьем, около 50% стока приходится на период с мая по июнь.

Устье Северной Двины — приливное. Период приливных колебаний составляет около 12,5 часов. На морском крае дельты величина сизигийного прилива около 1,3 м, квадратурного — до 0,8 м. Приливы классифицируются как полусуточные, асимметричные (время подъема на 40–60 минут больше времени спада) и осложнены специфическим явлением, называемым «маниха» — приостановка или замедление подъема уровня во время прилива [13]. Течения на устьевом участке носят реверсивный характер, то есть в меженных условиях речного стока во время отлива направлены из реки в море, в период прилива разворачиваются на обратные. Длина участка с реверсивными течениями достигает 90 км. При сильных северо-западных ветрах, обычно в октябре–ноябре, в устье Северной Двины формируются нагоны, приводящие к затоплениям в дельте.

Окаймляющие дельту со стороны залива острова — Голец, Кумбыш, Гремиха — образовались как серии вышедших из-под уровня моря и причлененных к берегу береговых валов, превратившихся в песчаные гряды. Крупные острова средней части дельты — Угломин, Лясомин, Никольский — в прошлом также образовались причленением к берегу береговых валов, но впоследствии были преобразованы процессами торфообразования и заняты грядово-мочажинными озерковыми болотами и лесами. Острова привершинной части дельты, образованные процессами аккумуляции речных наносов, представляют собой ровные низменные заболоченные луга с пойменной разнотравно-крупнозлаковой растительностью. Окружающие дельту ледниковые моренные равнины с многочисленными озерами заняты хвойными еловыми и сосновыми лесами с примесью мелколиственных пород и болотами.

В вершине дельты Северной Двины находится крупный воднотранспортный узел Европейского севера России — Архангельск. На морском крае дельты в Северодвинске действуют крупные судостроительный и судоремонтный заводы. Берега дельтовых рукавов и проток в значительной степени освоены, на них размещены лесозаготовительные и лесопере-

Рис. 1. Дельта Северной Двины на снимке Sentinel-2B 18.07.2020

Fig. 1. The Northern Dvina River delta at the image from Sentinel-2B 18.07.2020

рабатывающие предприятия. Заболоченные земли островов мелиорируются и используются как луга и пастбища, а также под лесопосадки.

Велико историко-культурное значение региона, на протяжении нескольких веков игравшего роль морских ворот России.

Представления о динамике дельты Северной Двины по предшествующим работам

Дельта Северной Двины довольно хорошо изучена. Давнее заселение территории и ее активное хозяйственное использование, систематические наблюдения, проводимые с 1881 г. [4], палеогеографические исследования [6] и составленная В.Н. Коротавым с их учетом геоморфологическая карта [1], выполненные на местности локальные измерения разрушения берегов [3] способствовали тому, что у специалистов сложились определенные представления о динамике дельты.

Формирование дельты Северной Двины, начавшееся 5–7 тыс. лет назад, при заполнении наносами ингрессионного залива, образовавшегося в ходе последней послеледниковой трансгрессии [7], детально охарактеризовано геоморфологами [8] на основании материалов палеогеографических исследований [6]. Выделены три стадии развития дельты в голоцене: стадия эстуария (позднеледниковье-ранний голоцен); лагунная стадия (средний голоцен); стадия дельты выдвигания, начавшаяся в среднем голоцене и продолжающаяся в настоящее время.

Скорость и тип формирования дельты зависят от величины стока наносов и гидродинамики устьевого взморья. На основании распределения стока воды и наносов основывается мнение, что для рукавов Никольского и Корабельного характерны процессы аккумуляции отложений, а для среднего Мурманского рукава — процессы размыва [8]. Однако, данные об изменениях отметок дна в рукавах [4] указывают на другое распределение процессов в устьевых зонах рукавов. В Никольском и Мурманском рукавах отметки дна понижаются и устьевые бары этих рукавов интенсивно перемещаются в сторону моря, а в Корабельном рукаве отметки дна постепенно повышаются, и устьевая отмель стабильна [2].

Вдоль морского края дельты, где сильно действие морских факторов, дельту обрамляют острова волноприбойного происхождения [2]. Материал для их формирования, кроме осаждающегося на устьевом баре речного аллювия, дает поток песчаных наносов с северо-востока. Правый берег Двинского залива (Зимний берег), приподнятый, сложенный осадочными породами и перекрывающимися их ледниковыми отложениями, обрывается к морю 30-метровым клифом. Его выступы — мысы Куйский и Толстоменский — размываются и дают начало потоку наносов, следующему на юг, а затем поворачивающему вслед за изгибом берега на юго-запад и участвующему в реформировании островов

вдоль морского края дельты [14]. Молодые береговые валы на периферии этих островов, по мнению геоморфологов, прирастают и до настоящего времени [8], а морской канал заносится речными наносами, слой отложений достигает 75 см [2]. Под воздействием преобладающих западных ветров береговые бары на внешнем крае дельты на ранних этапах ее развития смещались на восток, что предопределило смещение в этом направлении и устьев основных рукавов дельты. В результате направление рукавов искривилось, активизировался размыв правых берегов рукавов [10]. Устойчивая тенденция к смещению трех основных рукавов дельты к востоку за счет боковой эрозии правых берегов составляет особенность вековой динамики дельты; за период 5000 лет это смещение достигло 5–7 км [5], что отражает геоморфологическая карта дельты [1]. В противоположность этому низменные правые берега рукавов и острова южной, привершинной части дельты — районы современной речной аккумуляции — заливаются в половодье и наращиваются за счет отложения речных наносов [8].

Наша цель — проверить правильность сложившихся представлений на основании объективной картины, выявляемой при сравнении разновременных материалов космической съемки, составив по разновременным космическим снимкам карту динамики дельты, что в условиях приливной дельты представляет не простую задачу.

Материалы и методы исследований

Выбор снимков

Снимки из космоса, пригодные для изучения земной поверхности, начали получать с 1970-х годов. Оптико-электронные методы съемки с передачей информации по радиоканалам тогда не обеспечивали высокого разрешения снимков, и детальную информацию получали фотографическими системами, в частности, со спутников военной разведки. В нашем исследовании в качестве детальных снимков, характеризующих дельту Северной Двины на ранний период, использованы снимки с американского разведывательного спутника KeyHole-9, которые теперь находятся в свободном доступе в архиве USGS. На межлетний период удалось найти безоблачные снимки, сделанные в июле 1977 г. Съемка выполнена панорамной стереосъемочной системой КА KeyHole-9, предназначенной для визуального дешифрирования и поиска объектов. Система состоит из двух щелевых панорамных фотоаппаратов с фокусным расстоянием около 1,5 м и обеспечивает получение стереоскопического изображения земной поверхности в виде полос шириной 15–30 км в направлении полета и до 680 км в поперечном направлении. Оригинальная съемка выполнена на панхроматическую фотопленку, использованные нами материалы получены ее сканированием с разрешением, соответствующим 15 м на местности.

Всего было отобрано 8 практически безоблачных полос-кадров съемки, проведенной 7.07.1977, покрывающих всю территорию дельты.

Для исследования современного состояния дельты использованы снимки со спутника Sentinel 2B с атмосферной коррекцией из архива Европейского космического агентства (ESA). Они предоставляются пользователям в виде ортотрансформированных изображений 100x100 км в проекции UTM/WGS84, каждое из которых покрывает территорию, значительно превышающую площадь дельты Северной Двины. Съемочная система Sentinel 2B — MSI оснащена 12-ю каналами с разрешением 10, 20 и 60 м в интервалах спектра, необходимых как для определения границы вода-суша (каналы 8: 0,78–0,89 мкм; 11: 1,56–1,66 мкм; 12: 2,09–2,28 мкм), так и для исследования подводного рельефа дельты и периодически затапливаемой зоны осушки (каналы 2: 0,46–0,53 мкм; 3: 0,54–0,58 мкм; 4: 0,65–0,68 мкм).

Выбор даты съемки определяется наличием безоблачных снимков на дату, близкую к снимку 1977 г. На июль 2020 г. отобрано три безоблачных снимка — 18, 19 и 26 июля. Так как при исследова-

нии многолетней динамики приливных дельт необходимо использование разновременных снимков, сделанных в отсутствии нагонов и при одинаковой или близкой фазе прилива, по данным Морских гидрометеорологических станций «Северодвинск» и «Мудьюг» и Морского гидрометеорологического поста «Соломбала» Северного УГМС установлены фазы приливо-отливных колебаний и значения уровня воды в момент получения снимков, а также наличие сгонов-нагонов в предшествующий период [12]. Для снимка KeyHole 1977 г., июльских снимков Sentinel-2B 2020 г., использовавшихся при отборе базового снимка для сравнения с 1977 г., и снимка со спутника Landsat 2000 г., предназначенного для промежуточного контроля изменений дельты за длительный интервал времени, эти данные приведены в табл. 1.

Приливо-отливные колебания уровня оцениваются морским и сухопутным потребителем не одинаково. На топографических картах указывается средняя величина прилива. Для морских карт более значимо состояние акватории при отливе. Из соображений, чтобы приливо-отливные колебания не мешали исследованию долговременной динамики

Табл. 1. Гидрометеорологические показатели на момент получения снимков по данным станций и постов Северного УГМС в устьевой области Северной Двины

Tab. 1. Hydrometeorological indicators at the time of obtaining images according to the data of stations and posts of the Northern UGMS in the mouth area of the Northern Dvina

Дата и время съемки	Фаза приливо-отливных колебаний уровня воды	Влияние сгонов - нагонов на уровень воды	Уровень воды
1977.07.07 11:35±15 мск	Приливный рост уровня воды по всей дельте	5–7 июля в Северодвинске: ветер СВ и СЗ направлений 3–7 м/с с порывами до 11 м/с. По графику уровней воды признаков нагонных или сгонных условий не выявлено.	Мудьюг H= –0,32 м БС Северодвинск H= –0,18 м БС Соломбала H= –0,27 м БС
2000.07.18 11:30 мск	Верхняя часть дельты – спад уровня воды на отливе. Морской край дельты – уровень близок к «малой воде», отлив.	16–18 июля в Северодвинске: ветер ЮВ и ЮЗ направлений 2–5 м/с с порывами до 10 м/с. По графику уровней воды признаков нагонных или сгонных условий не выявлено.	Мудьюг (нет данных) Северодвинск H= –1,1 м БС Соломбала H= –0,4 м БС
2020.07.18 11:45 мск	Верхняя часть дельты – уровни близкие к «малой воде», отлив Морской край дельты – приливный рост уровня воды	16–18 июля в Архангельске ветер СВ–З направлений 1–4 м/с. По графику уровней воды признаков нагонных или сгонных условий не выявлено.	Мудьюг H= –0,41 м БС Северодвинск H= –0,35 м БС Соломбала H= –0,63 м БС
2020.07.19 12:06 мск	Верхняя часть дельты – уровни близкие к «малой воде», отлив Морской край дельты – приливный рост уровня воды	17–19 июля в Архангельске штиль, ветер ЮЗ–СВ направлений 1–3 м/сек. По графику уровней воды признаков нагонных или сгонных условий не выявлено.	Мудьюг H= –0,48 м БС Северодвинск H= –0,39 м БС Соломбала H= –0,64 м БС
2020.07.26 11:56 мск	Верхняя часть дельты – уровни близкие к «полной воде», прилив Морской край дельты – спад уровня воды на отливе	24–26 июля в Архангельске штиль, ветер ЮЮЗ–В направлений 1–3 м/сек. По графику уровней воды признаков нагонных или сгонных условий не выявлено.	Мудьюг H= –0,04 м БС Северодвинск H= –0,44 м БС Соломбала H= –0,27 м БС

берегов, целесообразней использовать среднее положение между большой и малой водой. Но при этом наиболее важно, чтобы приливная фаза была одинаковой или близкой для разногодичных снимков.

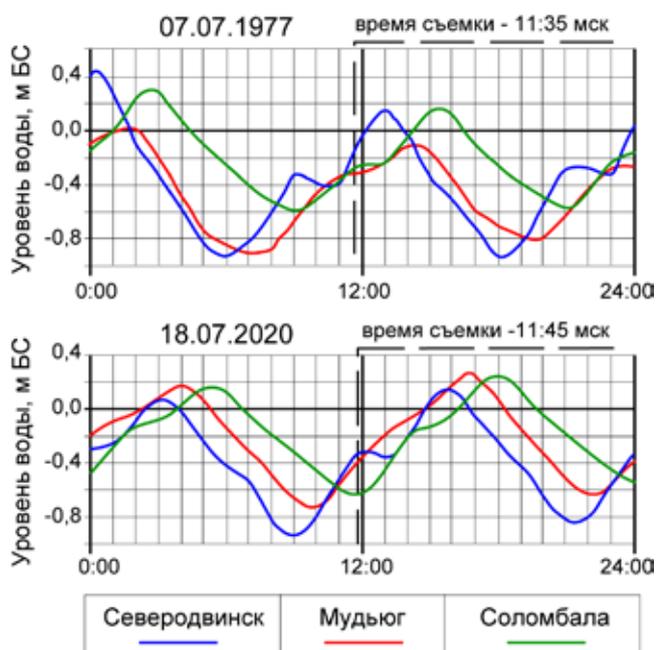
Данные табл.1 и рис.2, воспроизводящего графики приливно-отливных колебаний уровня моря во время выполнения съемки, обосновывают выбор пары космических снимков для исследования динамики дельты Северной Двины за период 1977–2020 гг.

Снимок 7 июля 1977 г. оказался удачным в отношении уровня моря. Значения уровня для Соломбалы (–0,27) и Мудьюга (–0,32) близки к среднему уровню Белого моря (–30) и отражают фазу «манихи» — приостановки приливного роста уровня. И только в Северодвинске отмечен приливной рост уровня до значения –0,18, то есть на 0,12 м выше среднего уровня Белого моря.

На 2020 г. была возможность сделать выбор из безоблачных снимков 18, 19 и 26 июля. Значения уровня на момент съемки и графики приливно-отливных колебаний уровня свидетельствуют в пользу снимка 18 июля, когда по всему морскому краю зафиксировано начало-середина приливного роста уровня, при значениях, относительно близких к среднему уровню Белого моря (Северодвинск –0,35, Мудьюг –0,41); однако, в Соломбале в это время отлив, малая вода (–0,63), что необходимо учитывать при анализе динамики русловых островов. Снимок

Рис. 2. Приливно-отливные колебания уровня на дату съемки KeyHole (07.07.1977) и Sentinel-2В (18.07.2021) по данным гидрометстанций Северодвинск, Мудьюг и гидрометпоста Соломбала

Fig. 2. Tidal level fluctuations for KeyHole (07.07.1977) u Sentinel-2В (18.07.2021) days of surveying by data of Severodvinsk and Mudyug hydrometeorostations and Solombala hydrometeoropost



19 июля зафиксировал состояние отлива, а 26 июля начало отлива на морском крае, но прилив в верхней части дельты, и для сопоставления со снимком 1977 г. они не целесообразны.

Чтобы получить представление о колебаниях положения береговой линии в связи с ее динамикой при приливах и отливах, на период межени 2020 года было найдено 8 снимков Sentinel 2В с нулевым или минимальным облачным покрытием: 24 июня, 18, 19, 26 июля, 20 и 22 августа, 2 и 4 сентября, отображающих положение береговой линии в разные фазы приливных колебаний уровня воды. Эти снимки в дальнейшем были использованы для создания рабочей карты колебаний положения береговой линии в период межени 2020 г., которую впоследствии удалось использовать для контроля достоверности составленной карты динамики дельты.

Предварительная обработка и подготовка снимков для сопоставления

Панорамные снимки KeyHole на панхроматическую фотопленку, покрывающие территорию дельты в виде 8 кадров — полос шириной 17 км, соединены в фотоплан с коррекцией панорамных искажений исходных снимков [15], применением блочной фототриангуляции, ортотрансформирования с использованием цифровой модели рельефа AsterDEM и составлением мозаики из обработанных снимков. Для геометрического согласования разновременных материалов трансформирование фотоплана в проекцию UTM/WGS84 проводилось с использованием координат свыше 100 опорных точек, опознанных на более детальном снимке Sentinel 2В. Точность фотоплана оценивается исполнителями в 10–30 м на различных его участках в зависимости от их обеспеченности опорными точками.

Определение береговых линий (границы вода-суша) на разновременных снимках, их совмещение (создание «предкарты») и составление карты динамики дельты

Положение береговой линии на начальную дату 1977 г. определено визуальным дешифрированием снимков KeyHole с точностью 20–50 м, определяемой степенью выраженности береговой линии на панхроматических снимках и точностью фотоплана, а на 2020 г. по результатам контролируемой классификации снимка Sentinel-2В (каналы 2, 3, 4, 8, 10, 11, 12) методом минимального расстояния на классы «вода» и «суша» с точностью, сопоставимой с разрешением исходного снимка 10 м. Путем совмещения результатов определения береговых линий 1977 и 2020 гг. получена «предкарта», отображающая появление воды на месте суши (размыв берегов, затопление) и образование суши на месте воды (выдвижение берега в результате аккумуляции наносов, образование островов). «Предкарта» содержит информацию об изменениях береговой линии и площадей участков суши и акватории и играет

роль источника для создания карты динамики дельты. Для учета значимости выявленных изменений проведено сопоставление полученных величин изменений с точностью сравниваемых материалов и потенциально ошибочные результаты исключены.

При составлении карты динамики дельты выполнен отбор контуров в соответствии с определенной ранее точностью обработки снимков и масштабом создаваемой карты 1:125 000, и при необходимости осуществлен переход к внемасштабным обозначениям. На карте показаны участки размыва берегов, появления воды на месте суши и участки выдвигания берегов.

Составление карты приливных колебаний уровня для их учета при анализе динамики дельты

Чтобы учесть влияние приливно-отливных колебаний при оценке многолетней динамики береговой линии в дельте, дополнительно была составлена рабочая карта приливных колебаний положения береговой линии в межливный период 2020 г. Для этого путем квантования по единому экспериментально установленному уровню яркости в ближней инфракрасной зоне (8 канал) каждого из восьми отобранных снимков Sentinel-2B, соответствующих различным фазам приливных колебаний уровня воды, выполнено разделение на объекты вода-суша. Затем, путем сложения восьми полученных таким образом бинарных изображений, составлена карта, отображающая разные стадии затопления территории дельты Северной Двины, а также участки суши, не затопляемые во время приливов, и участки акваторий, не осушаемые во время отливов. Карта на качественном уровне характеризует частоту отображения зоны осушки в затопленном состоянии на исходных снимках в связи с приливно-отливными колебаниями уровня воды. Карта создавалась с целью учесть влияние приливных колебаний при исследовании многолетней динамики береговой линии в дельте Северной Двины и оказалась полезной для оценки достоверности выявленных изменений, что будет показано ниже.

Результаты исследований. Анализ динамики дельты

Составленная карта отражает динамику дельты с 1977 г. — с того времени, когда появились космические снимки, достаточно детальные для анализа изменений береговой линии. На более ранние сроки береговая линия зафиксирована топографическими и обзорно-топографическими картами, созданными по материалам аэрофотосъемки 1960-х годов. Поэтому, чтобы увеличить временной интервал анализа, в дополнение к составленной карте динамики дельты мы использовали близкую к ней по детальности обзорно-топографическую карту масштаба 1:500 000 1966 г. Для контроля изменений в пределах длительного 43-летнего периода 1977–2020 гг. использовались снимки со спутника Landsat/ETM 2000 и 2001 г. Последовательный ана-

лиз выявленных изменений осуществлялся по морфологическим районам дельты.

Острова вдоль морского края дельты

С северо-запада дельту окаймляет баровая отмель, отделяющая дельту от ее эстуария — Двинского залива. На баровой отмели между выходами в залив основных рукавов сформировались под влиянием речных и морских процессов острова вдоль морского края дельты. Крайний северо-восточный из них — небольшой остров Кошка-Скандия — представляет собой песчаную отмель, вышедшую из-под уровня воды, расположенную у левого борта Морского канала. На снимках 1977 и 2020 гг. отобразилась часть гребня отмели в виде вала длиной 350 м и шириной 50 м. Совмещение снимков показывает, что за 43 года отмель переместилась на ЮВ на 700 м, с среднегодовой скоростью 16 м/год. Дополнительное совмещение со снимком 2000 г. позволяет увидеть промежуточное положение острова (рис. 3). Такое существенное перемещение отмели, возможно, связано с регулярно выполняемыми работами по расчистке Морского канала от наносов.

Между устьевыми расширениями Корабельного и Мурманского рукавов, судя по карте 1966 г., существовала группа островов Голец и Разбойник, которые показаны как отдельные острова и на всех предыдущих картах. К 1977 г. эти острова сблизились, были разделены лишь двумя небольшими протоками шириной 20–50 м, а снимки 2020 г. зафиксировали полное соединение этих островов (рис. 4). Объединенный остров Голец-Разбойник, судя по современным снимкам, со стороны Двинского залива

Рис. 3. Изменение положения острова Кошка-Скандия в 1977–2020 гг. (цветовой синтез разновременных снимков (KeyHole 1977, Landsat7 2000, Sentinel 2B 2020))

Fig. 3. Change of the island Koshka-Scandiya displacement at 1977–2020 (color synthesis of multi-temporal images (KeyHole 1977, Landsat7 2000, Sentinel 2B 2020))

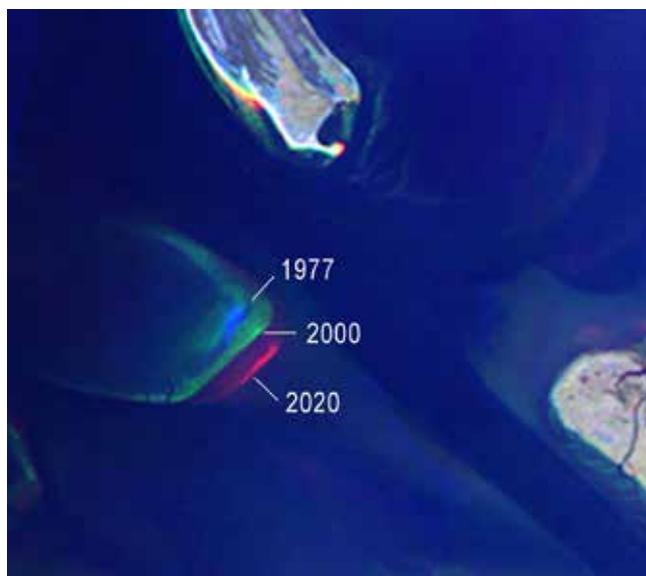




Рис. 4. Острова вдоль морского края дельты на карте динамики дельты (условные обозначения для рис. 4, 6, 7, 8). На врезке фрагмент обзорно-топографической карты 1966 г.

Fig. 4. Islands along delta sea edge at the map of delta dynamics (legend for fig. 4, 6, 7, 8). The inset shows a fragment of the 1966 survey-topographic map

окаймлен серией песчаных береговых валов. Вали были видны и на снимке 1977 г. В северо-восточной части острова причленение валов продолжалось и к 2020 г., но в средней части произошел размыв ранее причлененных валов и береговая линия отступила на 100 м, а в крайней юго-западной части острова до 250 м, но здесь размыв со стороны моря сопровождался нарастанием берега со стороны Мурманского устьевое расширения. Нарастание суши происходило и на других участках южного берега этого острова. Большая часть территории объединенного острова Голец-Разбойник к 2020 г. покрыта травяно-кустарниковой растительностью, на песчаных грядах бывших береговых валов растут сосновые леса.

Пролив между островами Голец и Лаида — Сафроновская Губа — в 1966 г. был свободным, а к 2020 г. почти полностью зарос, и лишь извилистая многорукавная протока шириной 150–300 м разделяет острова Голец и Лаида, который, в свою очередь, почти полностью присоединился к крупному Никольскому острову дельты.

Существенные изменения морского края произошли между Мурманским и Пудожемским устьями, где расположены острова Кумбыш и Гремиха (см. рис. 4).

Остров Кумбыш в 1966 г. по площади был вдвое меньше современного. Со стороны моря его окаймляли узкие левые устьевые косы Мурманского рукава. К 1977 г. косы расширились и причленились к острову, лагуны между ними заросли, и площадь

острова увеличилась. К 2020 г. продолжилась аккумуляция материала, берег выступил в юго-западном направлении на 1 км, остров приобрел квадратную форму. В то же время на северо-западном берегу острова, со стороны залива, и на северо-восточном, со стороны Пудожемского устья, произошел размыв материала бывших устьевых кос со смещением береговой линии в сторону суши на 200 м. Территория вновь образовавшейся западной части острова Кумбыш представляет собой серию параллельных берегу песчаных гряд. В старой восточной части острова песчаные гряды заросли сосновым лесом, в ложбинах между грядами сохранились озера.

Крайний внешний остров этой части морского края дельты — остров Гремиха — к 1977 г., по сравнению с 1966 г., удлинился в юго-западном направлении на 1 км за счет присоединения к нему песчаной отмели, которая в 2000 г. еще оставалась обнаженной, а к 2020 г. заросла травяно-кустарниковой растительностью. Удлинение южного конца острова продолжалось и в 1977–2020 гг., когда он выдвинулся на 200 м. Однако сравнение снимков 1977 г. и 2020 г. показывает, что береговая линия о. Гремиха со стороны залива отступила к суше на 50–100 м в северной и до 400 м в южной части; в этой полосе затопленного берега на современных снимках просматривается до 6 подводных валов. В противоположность этому, в восточной части остров Гремиха в это время расширялся, зарастали вдающиеся в него заливы, процессы аккумуляции охватили его вместе с группой расположенных восточнее остро-

вов Варгай, Тайнокурья, Подостров, которые расширились, а проливы между ними, имевшие ширину 500–700 м, сузились до 100–200 м. Группа объединившихся островов Варгай почти полностью присоединилась к северо-западному окончанию крупного дельтового острова Лясомин, их разделяет лишь протока шириной около 50 м.

Самый крайний западный остров морского края дельты — о. Ягры, на котором теперь расположен один из районов Северодвинска, уже к 1966 г. практически присоединился к дельтовому острову Угломин. От северного конца о. Ягры в прошлом отходила левая приустьевая коса устья Никольского рукава. К 1966 г. она была размыта у основания, отделилась от берега, и образовался остров Ягорский Рог. В 1977–2020 гг. его северо-западный берег подвергался размыву с отступанием береговой линии до 200 м.

В целом для всей группы островов морского края дельты характерны начавшиеся при потеплении климата процессы размыва или затопления их берегов со стороны Двинского залива при продолжающихся со стороны дельты процессах аккумуляции отложений, нарастания площади островов, сужения проливов, отделявших их от островов внутренней дельты.

Устьевые расширения основных рукавов

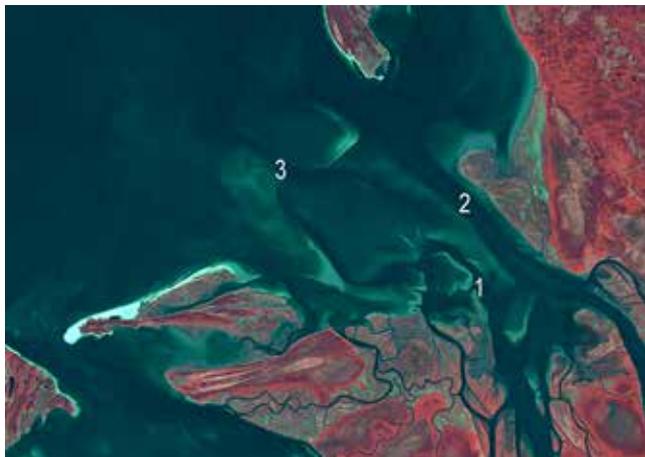
Для мелководных расширенных участков рукавов панхроматические снимки KeyHole, достаточно хорошо выявляющие береговую линию, но не отражающие рельеф дна, мало информативны. Поэтому для анализа динамики мелководной зоны устьевых расширений привлекаются разновременные снимки Landsat и Sentinel, а карта динамики отражает изменения лишь берегов.

Снимок Landsat 19.06.2001 хорошо передает картину рельефа дна мелководной зоны (рис. 5). В Корабельном устьевом расширении среди обширных отмелей четко выделяются подводное продолжение русла Корабельного рукава с его крутыми поворотами (1), прямолинейная полоса Морского канала (2), а также сохранившиеся участки ранее существовавшего морского канала (3). Валы, обрамляющие подводные русла и каналы, а также повышенные участки отмелей создают выразительный рисунок рельефа дна. Этот рисунок полностью повторяется и на снимках 2020 г., а просмотр «исторической линейки» снимков в информационной системе GoogleEarth убеждает в чрезвычайной стабильности этих мелководных форм донного рельефа, вполне соответствующих изобатам на топографической карте масштаба 1:200 000.

В Мурманском и Пудожемском устьевых расширениях, более отгороженных от залива островами морского края дельты, формы рельефа дна выражены менее четко. Для полосы мелководья шириной 1–2 км вдоль левого берега Мурманского устьевое расширения (см. рис. 4), характерно небольшое ак-

Рис. 5. Корабельное устьевое расширение на снимке Landsat 19.06.2001 (пояснение номеров в тексте)

Fig. 5. The mouth wideness Korabelynoe at Landsat image 19.06.2001 (numbers explanation in text)



кумулятивное выдвигание берега до 100 м и заселение зоны приливной осушки донной растительностью, хорошо выделяющейся на снимках 2000 и 2020 г., для развития которой режим переменного затопления и обсыхания создает благоприятные условия.

Основные рукава дельты

Во внутренней части дельты, где ее преобразования связаны с речными процессами, главным образом отложением наносов, во всех основных рукавах дельты при сравнении разновременных карт и снимков прослеживаются в первую очередь изменения русловых островов, и в меньшей мере — изменения берегов рукавов и протоков.

В Никольском рукаве (рис. 6), на его широтном участке между поселками Глинник и Рикаси-ха, на карте 1966 г. была показана цепочка небольших островков. К 1977 г. они сгруппировались в три массива — о. Виченка, группа о-вов Свинец и Сви-нецкая Кошка, и о-ва Вагинские Кошки. Эти группы были разделены широкими (500 м) протоками, которые к 2020 г. частично были занесены песком, а сами острова расширились. Как указано в [3], вблизи о. Виченка находился пункт складирования грунта после расчистки фарватера. Дополнительное поступление материала от него способствовало нарастанию островов и отмелей в Никольском рукаве.

На излучине русла в районе поселков Шихири-ха — Бармино в 1977 г. зафиксированы два острова, отсутствующие на карте 1966 г. В 2000 г. к ним добавилась третий, на них появилась растительность и к 2020 г. все три острова расширились. У правого берега Никольского рукава на этом отрезке к 2000 г. появилась, а к 2020 г. начала зарастать песчаная отмель.

В нижней части Никольского рукава, при переходе из него в Пудожемское расширение, судя по карте 1966 г., существовали две группы небольших



Рис. 6. Рукав Никольский на карте динамики дельты

Fig. 6. The river brunch Nikol'skiy at the map of delta dynamics

островов. Снимок 1977 г. показывает, что площади их расширились, протоки между ними сузились, а к 2020 г. они объединились в два больших острова Чаячий-Шакилов и Нестеровский-Чиракин, полностью заросших травяно-кустарниковой растительностью. По правому берегу этих островов и в их устьях на несколько километров вниз по течению тянутся полосы отмелей, на которых поселяется во-

дная растительность, а ниже острова Нестеровский к 2020 г. образовался длинный (более 1 км) песчаный осередок.

Мурманский рукав (рис. 7), по сравнению с Никольским, более свободен от островных русловых образований. На его верхнем широтном участке, в 2,5 км ниже его истока при отделении от Корабельного рукава, у правого берега образовался узкий



Рис. 7. Северо-восточная часть дельты на карте динамики дельты

Fig. 7. The Northern-Eastern part of delta at the map of delta dynamics

остров, который в 1977 г. имел длину 800 м, а к 2000 г. стал вдвое длиннее, и от правого берега его отделяла очень узкая протока; к 2021 г. протока заросла, и остров почти присоединился к правому берегу.

Ниже по течению, на меридиональном участке Мурманского рукава, произошла консолидация небольших островков, показанных на карте 1966 г. В 1977 г. они объединились в два острова, в 2000 г. почти соединились в один остров Тяжелая Кошка, разделенный лишь узкой протокой, которая к 2020 г. полностью заросла, а остров увеличился по площади.

При изменении направления рукава с меридионального на северо-западное, на участке перехода к Мурманскому устьевому расширению, на левом берегу на снимках 2000 г. и 2020 г. видны песчаные косы, образовавшиеся при изменении направления течения. Для правого, возвышенного берега острова Никольского на этом участке Мурманского рукава характерны процессы размыва, отмечавшиеся многими исследователями [3, 4, 10]. Совмещение снимков 1977 и 2020 гг. показывает, что берег отступил здесь до 70–80 м, с среднегодовой скоростью около 2 м/год. Ниже по течению в русле образуются шлейфы аккумуляции. На карте динамики выделяется двойная песчаная коса, сформировавшаяся ниже размываемого выступа правого берега.

В *Корабельном рукаве* разделяются его широкий южный отрезок (до истока Маймаксы), используемый для судоходства (рис. 8), и не используемый по условиям рельефа дна северный отрезок (см. рис. 7).

Широкая, но мелководная (до 5 м) южная часть первого отрезка, вблизи Архангельска, еще в 1966 г. была свободна от островов, а в северной части находился крупный остров Хабарка. На снимке 1977 г. южнее о. Хабарка видна выступившая из-под воды большая отмель, превратившаяся в остров, расположенный напротив Соломбалы. На снимке 2020 г. южнее нее, выделяется отмель с хорошо выраженным грядовым рельефом, протягивающаяся на юг до створа Архангельского яхт-клуба; ее отображение может быть связано с отливом на момент съемки.

На северном отрезке Корабельного рукава (см. рис. 7), с недостаточными для судоходства глубинами, на карте 1966 г. показано, а на снимке 1977 г. видно несколько небольших (в его южной части) и более крупных (в северной части) песчаных русловых островов. В 2020 г. это уже покрытые растительностью острова, присоединение среднего острова к правому берегу закончилось. Острова в северной части рукава — остров Линский и др. — расширились, удлиннились вниз по течению до 700 м и сильнее приблизились к левому берегу. Вдоль правого берега в приустьевой зоне рукава цепочка небольших островов ограничивает активную часть руслового потока.

Вершина дельты с истоками основных рукавов. Водотоки внутренней зоны дельты

В вершине дельты, вблизи Архангельска, единый поток Северной Двины разделяется на рукава, в истоках которых уже проявляются их основные

особенности (см. рис. 8). Так, направленный на запад широкий, но не глубокий Никольский рукав, уже в истоке перегорожен русловыми островами. Составленная карта показывает, что район вершины дельты вполне соответствует высказываемым гидрологами положениям о том, что русловые деформации наиболее активны на участках резкого изменения стока воды вследствие разделения или слияния водотоков [2, 4]. Такие деформации русел проявляются у проток Братиловка, Рыболовка, Онишевка между рукавами Никольским, Корабельным и Мурманским. Для этих проток характерно меандрирование и на изгибах меандр за исследуемый период четко проявились процессы аккумуляции отложений на выпуклых участках берега и размыва на вогнутых; крутизна меандр увеличилась, а положение русел изменилось.

Отмеченные изменения характерны для относительно широких водотоков (шириной 200–500 м), но они сочетаются с заметным уменьшением ширины малых водотоков вплоть до их полного исчезновения. Сеть малых водотоков между основными рукавами дельты наиболее густа в западной части дельты, между Никольским и Мурманским рукавами, и значительно менее развита в восточной части дельты. Для левобережья Мурманского рукава (см. рис. 7), характерно повсеместное уменьшение ширины водотоков, вплоть до полного их исчезновения, за счет зарастания берегов водотоков кустарниковой растительностью, активно развивающейся при потеплении климата. При исчезновении водотоков на снимках наблюдаются параллельные пары полос кустарников по бывшим берегам и полосы травянистой растительности между ними на месте заросшей речки. Это — примечательная черта динамики малых водотоков на островах в западной части дельты Северной Двины. На островах восточной части дельты, между рукавами Мурманским, Корабельным, Маймаксой и протокой Кузнечихой (см. рис. 7), ширина мелких водотоков, образующих здесь разреженную сеть, также уменьшилась, а некоторые из них исчезли, в том числе, как сообщается в литературе [3] они были засыпаны отходами широко развитого по берегам Маймаксы лесопильного производства. По излучинам берегов рукава Маймакса и протоки Кузнечиха на карте динамики дельты выявлены чередующиеся участки размыва и нарастания берега, обычно шириной до 50 м, то есть со скоростью изменений около 1 м/год. Выполненные на местности измерения на некоторых из этих участков [3] показали такой же темп изменений. При впадении Кузнечихи в Маймаксу затоплена более широкая полоса берега 100–200 м и русло Кузнечихи расширилось. В то же время выше по течению в русле Кузнечихи появилось несколько русловых островов, удлинился почти на 600 м остров Шилов напротив Соломбалы, произошло приращение крупных островов к левому берегу.

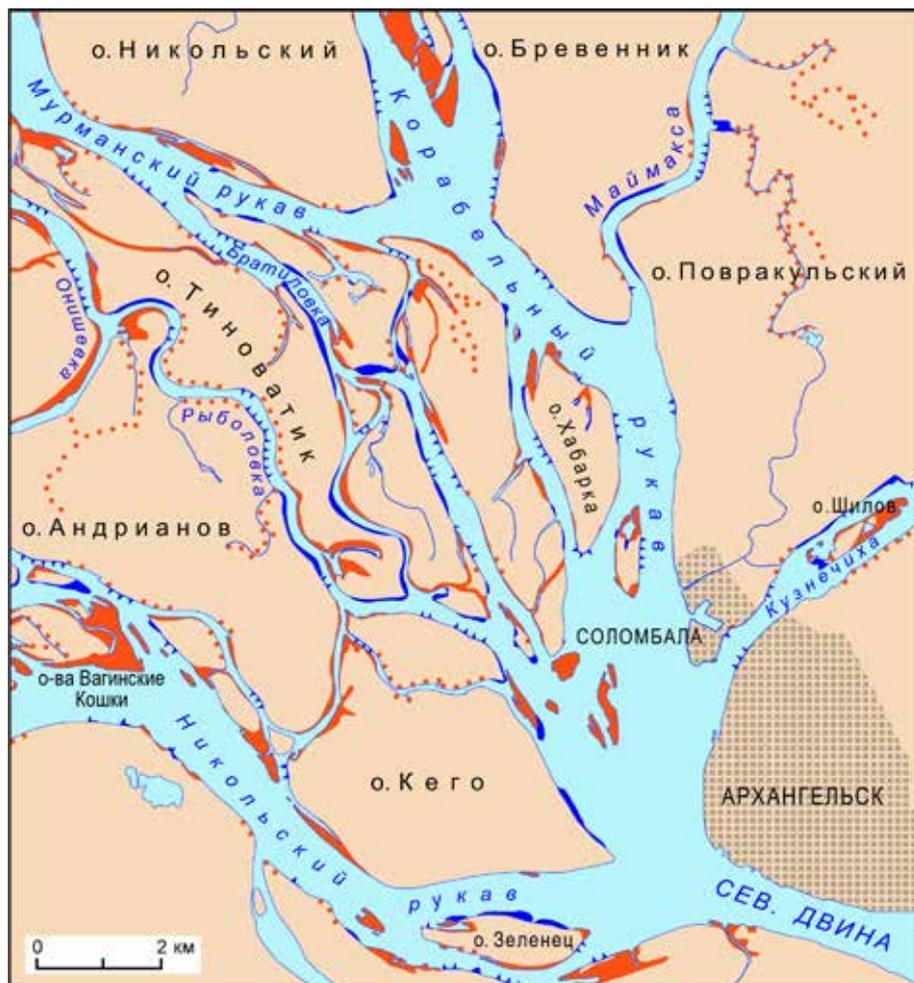


Рис. 8. Северо-восточная часть дельты на карте динамики дельты

Fig. 8. The Northern-Eastern part of delta at the map of delta dynamics

В целом на островах внутренней части дельты преобладают процессы аккумуляции речных наносов, обмеления и зарастания мелких водотоков, а в привершинной части дельты происходят русловые переформирования сети проток между рукавами.

Контроль карты динамики дельты с учетом приливных колебаний уровня

Составленная по восьми безоблачным снимкам дельты Северной Двины, полученным в меженьный период 2020 г., карта приливных колебаний уровня воды, дающая приблизительную качественную оценку частоты приливного заливания поверхности дельты, использована для контроля правильности выделения участков нарастания суши или размыва и затопления берегов. Покажем это на участках с разным характером динамических процессов — на примере островов морского края дельты, отмельных берегов устьевых расширений главных рукавов, русловых островов главных рукавов.

1. Острова вдоль морского края дельты — Голец-Разбойник, Кумбыш, Гремиха

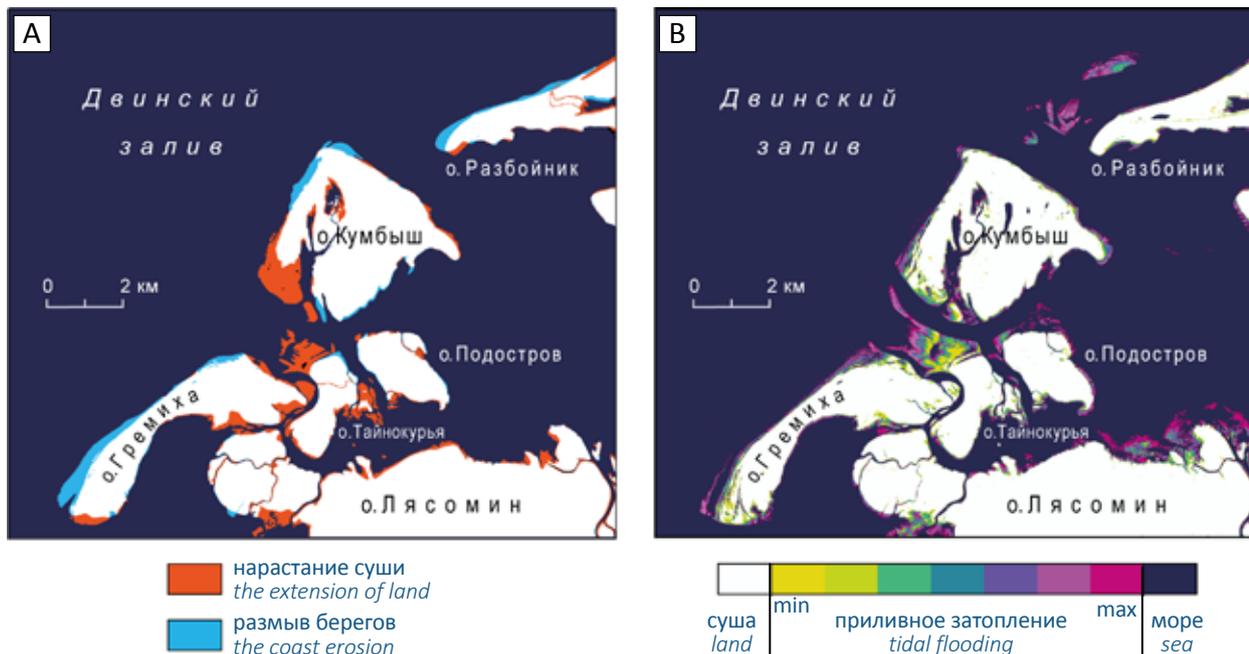
На рис. 9 приведены фрагменты карты динамики дельты и карты приливных колебаний уровня для этого района. Выявленные и показанные на

карте динамики процессы размыва или затопления мористых берегов этих островов со стороны Двинского залива полностью подтверждаются — приливо-отливные колебания уровня нигде не изменяют конфигурации контуров размыва. Обращенные к дельте берега этих островов, где происходит аккумуляция отложений и нарастание суши, перекрываются приливыми колебаниями уровня с малой частотой (желто-зеленые оттенки на карте, 20–30%). И лишь мелководные участки аккумулятивного накопления материала мористее группы островов Тайнокурья, обращенные к Двинскому заливу, перекрываются водой при приливах с частотой, увеличивающейся по направлению к заливу (фиолетово-розовые оттенки). Показанные на карте динамики площади нарастания суши оказались соответствующими средней частоте перекрытия приливами (зелено-голубые оттенки, до 50%), что подтверждает правильность составленной карты.

2. Вытопленный левый берег устьевого расширения Мурманского рукава с широкой мелководной зоной (рис. 10).

Карта динамики показывает в целом стабильное состояние этого берега при небольшом выдвигании в мелководную зону устьевого расширения. Карта приливных колебаний уровня отражает рельеф мел-

Рис. 9. Острова вдоль морского края дельты на «предкарте» динамики дельты (А) и на карте приливных колебаний (В)
 Fig. 9. Islands along delta sea edge at the previous map of delta dynamics (A) and at the map of tidal level fluctuations (B)



ководной зоны, в которой микроповышения очень редко обнажаются при отливе (розово-фиолетовые оттенки, частота затопления более 50%), а прибрежные участки постоянно ритмично то перекрываются водой, то обнажаются (зелено-голубые оттенки), благодаря чему на них развивается подводная растительность. Здесь картина приливных колебаний уровня вполне подтверждает выявленную на карте динамики стабильность берега при слабом нарастании суши.

В правой части этого фрагмента участки зарастания мелких водотоков на островах дельты вполне подтверждаются малой частотой их заливания при приливах (10–20%).

3. Русловые острова в основных рукавах дельты.

Острова в верхней части Никольского рукава, имеющей широтное направление, — Зеленец, Вагинские Кошки, Свинец, Виченка — наименее подвержены действию приливов. Четкие контуры этих крупных консолидированных островов почти не изменяются в течение суток, и на карте приливных колебаний уровня не имеют радужной окантовки. Иная картина в нижней части Никольского рукава и на русловых островах Мурманского и Корабельного рукавов. Нарастание островов в области ухвостьев, проявляющееся в виде шлейфов или гряд, вытянутых вниз по течению, отражается на карте приливных колебаний. Частота покрытия ухвостьев приливными водами подчеркивает постепенное уменьшение высоты песчаных гряд. Контроль по

Рис. 10. Южный берег Мурманского устьевое расширения на «предкарте» динамики дельты (А) и на карте приливных колебаний (В)
 Fig. 10. The Southern coast of the mouth widening Murmanskoe at the previous map of delta dynamics (A) and at the map of tidal level fluctuations (B)

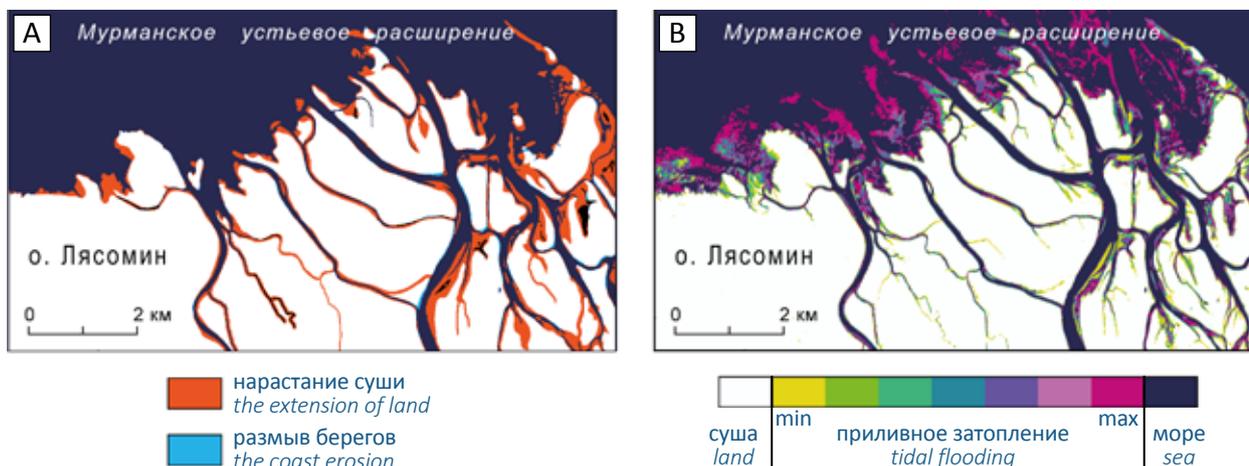
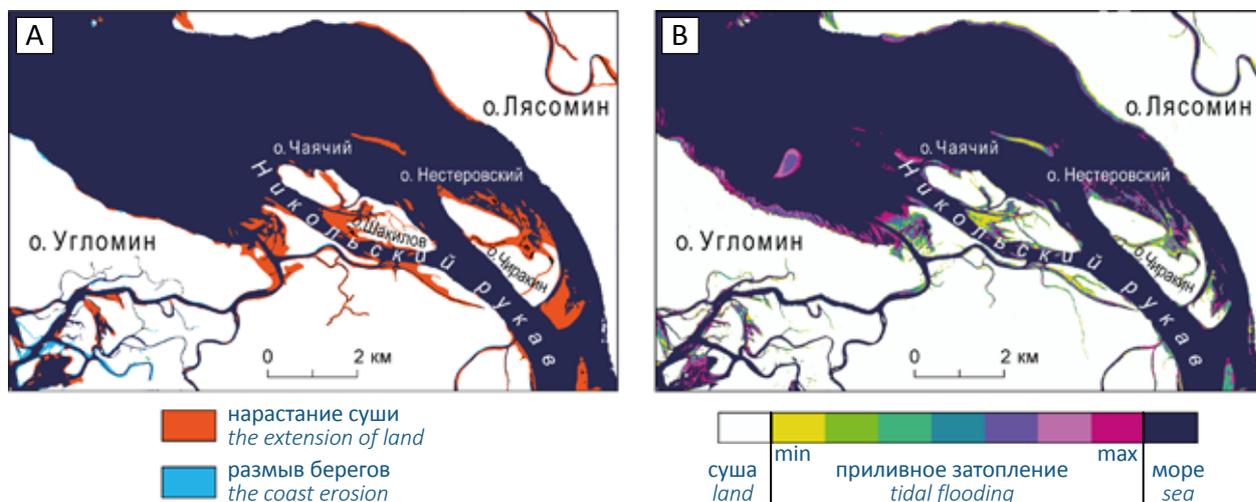


Рис. 11. Нижняя часть Никольского рукава и Пудожемское устьевое расширение на «предкарте» динамики дельты (А) и на карте приливных колебаний (В)

Fig. 11. The down part of river brunch Nikolskiy and the mouth wideness Pudozhemskoe at the previous map of delta dynamics (A) and at the map of tidal level fluctuations (B)



карте приливных колебаний позволяет удостовериться в правильности выделения аккумулятивных кос в ухвостьях в качестве островов. Покажем это на примере рис. 11, где в нижней части Никольского рукава в 1,5 км ниже объединенного острова Нестеровский-Чиракин на карте динамики дельты выделена в качестве острова песчаная коса. Карта приливных колебаний показывает, что она большую часть времени находится над поверхностью воды (частота заливания до 20–30%, желто-зеленые оттенки) и отнесение ее к образовавшемуся острову вполне правомочно. На этом же участке ниже объединенного острова Чаячий-Шакилов на карте приливных колебаний выделилась в продолжении этих островов коса, выходящая из-под воды в 20–30% случаев (частота заливания 60–70% и более, фиолетово-розовые оттенки). Она на карте динамики не показана, к вновь образовавшимся островам не отнесена, что вполне оправдано картой приливных колебаний уровня. То же самое относится и к отмели, находящейся в 3 км к западу, в южной части Пудожемского расширения — она выделяется на карте приливных колебаний с вероятностью появления на поверхности 30% и частотой заливания 70%, и на карте динамики дельты к образовавшимся островам не отнесена.

Эти примеры показывают, что карта приливных колебаний уровня может использоваться для контроля достоверности карты динамики дельты, что и было выполнено.

Заключение

Изучение и картографирование по космическим снимкам многолетней динамики дельт рек, подверженных действию приливов, требует учета фазы прилива в момент выполнения съемки. Необходим выбор снимков, отражающих близкую при-

ливно-отливную фазу на начало и конец периода исследований.

Анализ составленной по разновременным космическим снимкам карты динамики дельты Северной Двины за период 1977–2020 гг. показывает, что продолжается отмечавшееся и ранее нарастание и консолидация островов вдоль морского края дельты. Однако, к этой долговременной тенденции добавились четко выраженные процессы отступления мористых берегов этих островов, впервые зафиксированные составленной картой. Проявление процессов размыва на морском крае дельты Северной Двины отражает изменение в ее развитии в период потепления климата и подъема уровня моря, когда на берегах Белого моря, как и других северных морей, отмечена активизация абразионных процессов. Однако одновременно с активизацией размыва на мористых берегах островов вдоль морского края, продолжалось их нарастание со стороны, обращенной к внутренней части дельты.

В основных рукавах дельты продолжались процессы нарастания русловых островов, объединения групп небольших разрозненных островков в руслах в более крупные острова.

На правых берегах основных рукавов дельты — Мурманского, Маймаксы, Корабельного устьевое расширение — продолжались процессы постепенного размыва, отмечавшиеся многими исследователями, темп которых за период 1977–2020 гг., однако, не превышал 1–2 м в год. При этом на левых низменных берегах основных рукавов, как это отмечалось и ранее, происходило приращение расширяющихся русловых островов к берегу.

Для верхней части дельты характерно переформирование русловой сети извилистых проток

между основными рукавами, увеличение крутизны меандр.

Претерпели изменение небольшие водотоки на дельтовых островах. Густая сеть водотоков между Никольским и Мурманским рукавами, как показывает карта динамики, поредела, ширина водотоков уменьшилась, некоторые водотоки заросли полностью. Такие изменения, возможно, связаны с развитием растительности при потеплении. В этом случае климатические изменения содействовали продолжению процессов аккумуляции и нарастания площадей суши в дельте. В восточной части дельты,

где сосредоточены лесопильные заводы, к этому добавилось антропогенное исчезновение малых водотоков в результате их засыпания отходами лесопиления [3].

Таким образом по дельте в целом наше исследование ее динамики за 1977–2020 гг. впервые показало, что в период потепления климата, на фоне продолжающихся преобладающих процессов аккумуляции и нарастания площади островов внутренней дельты, стали проявляться процессы размыва мористых берегов на островах вдоль морского края дельты.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 18-05-60221 и 19-35-60032.

Список источников

1. Архив погоды в Архангельске [Электронный ресурс] // rp5.ru. Расписание погоды / ООО «Расписание Погоды». Режим доступа: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Архангельске (дата обращения: 18.01.2021).
2. Атлас: Морфодинамика устьевых систем крупных рек арктического побережья России / под ред. В.Н. Коротаева, Г.И. Рычагова. – М.: АПР, 2017. – 148 с.
3. Бабич Д.Б., Коротаев В.Н., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Трансформация речного стока в устьях арктических рек // Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / под ред. Н.И. Алексеевского. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 188–230.
4. Брызгалов В.В., Скибинский Л.Э., Богунов А.Ю. Исследование устьевой области реки Северной Двины хронокартографическим методом. – Архангельск: Лодия, 2008. – 143 с.
5. Гидрология устьевой области Северной Двины / под ред. М.И. Зотина, В.Н. Михайлова. – М.: Гидрометеиздат, 1965. – 375 с.
6. Демиденко Н.А., Лупачев Ю.В., Репкина Т.Ю. Региональные особенности формирования эстуарно-дельтовых систем севера Европейской части России // Эстуарно-дельтовые системы России и Китая / под ред. В.Н. Коротаева. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 62–112.
7. Зарецкая Н.Е. История развития дельты р.Северной Двины в голоцене // Система Белого моря / под ред. И.А. Немировской, В.П. Шевченко, В.Г. Воронцовой. – Т. 4. – М.: Научный мир, 2017. – С. 268–292.
8. Коротаев В.Н., Алексеевский Н.И. Эрозионно-аккумулятивные процессы в устьях рек // Эрозионно-русловые системы / под ред. Р.С. Чалова. М.: Инфра-М, 2017. – С. 436–464.
9. Коротаев В.Н., Репкина Т.Ю., Романенко Ф.А. Геоморфология и история формирования устьевых систем арктического побережья России // Атлас: Морфодинамика устьевых систем крупных рек Арктического побережья России / под ред. В.Н. Коротаева, Г.И. Рычагова. – М.: АПР, 2017. – С. 33–40.
10. Магрицкий Д.В., Скрипник Е.Н. Опасные гидрологические процессы в устье Северной Двины и факторы их многолетней изменчивости // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2016. – № 6. – С. 59–70.
11. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. – М.: ГЕОС, 1997. – 413 с.
12. Михайлов В.Н., Горин С.Л. Новые определения, районирование и типизация устьевых областей рек и их частей – эстуариев // Водные ресурсы. – 2012. – Т. 39. – № 3. – С. 243–257.
13. Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А. Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 383 с.
14. Щербаков Ф.А. Белое море // Геоэкология шельфа и берегов морей России / под ред. Н.А. Айбулатова. – М.: Ноосфера, 2001. – С. 58–69.
15. Sohn H.G., Kim G., Yom J. Mathematical modelling of historical reconnaissance CORONA KH-4B imagery // The Photogrammetric Record. – 2004. – Vol. 19. – Iss. 105. – P. 51–66. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.0031-868X.2003.00257.x>.

References:

1. Weather archive in Arkhangelsk. In: rp5.ru. Reliable prognosis. Available at: https://rp5.ru/Weather_archive_in_Arkhangelsk (accessed 18.01.2021).
2. Korotaev V. N., Rychagov G. I. (eds.) Atlas: Morfodinamika ust'evykh sistem krupnykh rek arkticheskogo poberezh'ja Rossii [Atlas: Morphodynamics of mouth systems of large rivers of the Arctic coast of Russia]. Moscow: APR; 2017. 148 p.
3. Babich D.B., Korotaev V.N., Magrickij D.V., Mihajlov V.N. Transformacija rechnogo stoka v ust'jah arkticheskikh rek [Transformation of river runoff at the mouths of Arctic rivers]. In: Alekseevskij N.I. (ed.) Geojekologicheskoe sostojanie arkticheskogo poberezh'ja Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovanija. Moscow: GEOS; 2007. P. 188–230.
4. Bryzgalov V.V., Skibinskij L.J., Bogunov A.J. Issledovanie ust'evoj oblasti reki Severnoj Dviny hronokartograficheskim metodom [Study of the mouth area of the Northern Dvina River by the chronocartographic method]. Arkhangelsk: Lodia; 2008. 143 p.
5. Zotin M.I., Mihajlov V.N. (eds.) Hidrologija ust'evoj oblasti Severnoj Dviny [Hydrology of the mouth area of the Northern Dvina]. Moscow: Gidrometeoizdat; 1965. 375 p.
6. Demidenko N.A., Lupachev J.V., Repkina T.J. Regional'nye osobennosti formirovanija jestuarno-del'tovykh sistem severa Evropejskoj chasti Rossii [Regional features of the formation of estuarine-deltaic systems in the north of the European part of Russia]. In: Korotaev V.N. (ed.) Jestuarno-del'tovykh sistem Rossii i Kitaja. Moscow: GEOS; 2007. P. 62–112.
7. Zareckaja N.E. Istorija razvitiya del'ty r.Severnoj Dviny v golocene [The history of the development of the Northern Dvina River delta in the Holocene]. In: Nemirovskaja I.A., Shevchenko V.P., Voroncova V.G. (eds.) Sistema Belogo morja. T. 4. Moscow: Nauchnyj mir; 2017. P. 268–292.

8. Korotaev V.N., Alekseevskij N.I. Jerozionno-akkumuljativnye processy v ust'jah rek [Erosion-accumulative processes at river mouths]. In: Chalov R.S. (ed.) Jerozionno-ruslovyje sistemy. Moscow: Infra-M; 2017. P. 436–464.
9. Korotaev V.N., Repkina T.J., Romanenko F.A. Geomorfologija i istorija formirovanija ust'evyh sistem arkticheskogo poberezh'ja Rossii [Geomorphology and history of the formation of estuarine systems of the Arctic coast of Russia]. In: Korotaev V. N., Rychagov G. I. (eds.) Atlas: Morfodinamika ust'evyh sistem krupnyh rek Arkticheskogo poberezh'ja Rossii. Moscow: APR; 2017. P. 33–40.
10. Magritsky D.V. Skripnik E.N. Hydrological hazards in the mouth of the Northern Dvina river and the causes of their long-term variations. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*. 2016;6:59–70.
11. Mihajlov V.N. Ust'ja rek Rossii i sopedel'nyh stran: proshloe, nastojashhee i budushhee [Mouths of rivers in Russia and neighboring countries: past, present and future]. Moscow: GEOS; 1997. 413 p.
12. Mikhailov V.N., Gorin S.L. New definitions, regionalization, and typification of river mouth areas and estuaries as their parts. *Water Resources*. 2012;39(3);247–260. DOI: 10.1134/S0097807812030050.
13. Polonskij V.F., Lupachev J.V., Skriptunov N.A. Gidrologo-morfologicheskie processy v ust'jah rek i metody ih rascheta (prognoza) [Hydrological and morphological processes in river mouths and methods for their calculation (forecast)]. St. Petersburg: Gidrometizdat; 1992. 383 p.
14. Shherbakov F.A. Beloe more [White Sea]. In: Ajbulatov N.A. (ed.) Geojekologija shel'fa i beregov morej Rossii. Moscow: Noosfera; 2001. P. 58–69.
15. Sohn H.G., Kim G., Yom J. Mathematical modeling of historical reconnaissance CORONA KH-4B imagery. *The Photogrammetric Record*. 2004;19(105);51–66. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.0031-868X.2003.00257.x>.

Статья поступила в редакцию 26.12.2021, одобрена после рецензирования 11.01.2022, принята к публикации 10.02.2022.
The article was submitted 26.12.2021; approved after reviewing 11.01.2022; accepted for publication 10.02.2022.

Информация об авторах

Кравцова Валентина Ивановна

Доктор географических наук, ведущий научный сотрудник
Географического факультета Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1
e-mail: valentinamsu@yandex.ru
SPIN-код: 7097-6541

Вахнина Ольга Васильевна

Научный сотрудник Географического факультета Московского
государственного университета имени М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1
e-mail: vachnina-ov@yandex.ru
SPIN-код: 2303-0446

Лебедева Серафима Витальевна

Кандидат географических наук, гидролог отдела речных и
морских гидрологических прогнозов Северного управления
по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды,
163020, г. Архангельск, ул. Маяковского, д. 2
Научный сотрудник отдела информационного обеспечения
морской и водохозяйственной деятельности Государственного
океанографического института им. Н.Н. Зубова,
119034, Москва, Кропоткинский пер., д. 6
e-mail: hydrosima@gmail.com
SPIN-код: 8356-4159

Харьковец Евгений Георгиевич

Старший научный сотрудник Географического факультета
Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1
e-mail: e_x@geogr.msu.ru
SPIN-код: 4888-8144

Чалова Екатерина Романовна

Кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник
Географического факультета Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова;
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1
e-mail: ekar28@yandex.ru
SPIN-код: 8965-4284

Information about authors

Valentina Iv. Kravtsova

Doctor of Geographical Sciences,
Leading Researcher of Faculty of Geography
Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
e-mail: valentinamsu@yandex.ru
SPIN code: 7097-6541

Olga V. Vachnina

Research Scientist of Faculty of Geography
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
e-mail: vachnina-ov@yandex.ru
SPIN code: 2303-0446

Serafima V. Lebedeva

Candidate of Geographical Sciences,
Hydrologist of the River and Marine Forecasts Department, North-
ern Agency for Hydrometeorology and Environmental Monitoring,
2, Mayakovskogo str., Arkhangelsk, 163020, Russia
Researcher of the Department of Information Support of Marine
and Water Management, Zubov State Oceanographic Institute,
6, Kropotkinskiy pereulok, Moscow, 119034, Russia
e-mail: hydrosima@gmail.com
SPIN code: 8356-4159

Evgeniy G. Charkovets

Senior Research Scientist of Faculty of Geography Lomonosov
Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
e-mail: e_x@geogr.msu.ru
SPIN code: 4888-8144

Ekaterina R. Chalova

Candidate of Geographical Sciences,
Leading Researcher of Faculty of Geography Lomonosov Moscow
State University;
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
e-mail: ekar28@yandex.ru
SPIN code: 8965-4284