

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 528.7:551.435.126

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПОДВОДНОГО РЕЛЬЕФА В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ (НА ПРИМЕРЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ОТМЕЛЕЙ ДЕЛЬТЫ ЕНИСЕЯ)¹

© 2021 г. В. И. Кравцова^{а, *}, О. В. Вахнина^{а, **}, Е. Р. Чалова^а

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

*e-mail: valentinamsu@yandex.ru

**e-mail: vachnina-ov@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.10.2020 г.

После доработки 20.12.2020 г.

Принята к публикации 21.01.2021 г.

По снимкам со спутника “Sentinel-2”, сделанным в 2017–2019 гг., составлена карта отмелей в дельте Енисея, работа над которой высветила методические проблемы, возникающие при использовании космических снимков для исследования и картографирования подводного рельефа; предложены пути их решения. Учет глубины проникновения в воду солнечных лучей и анализ спектральной яркости подводных объектов позволили определить оптимальную для дешифрирования песчаных прирусловых отмелей зону спектра (красная зона) и варианты цветового синтеза. При ограниченном по погодным условиям Арктики выборе безоблачных снимков в связи с потребностью иметь снимки, полученные во время минимального уровня воды, учитывается не только сезон съемки (меженный период), но и межгодовые колебания стока. Мутность вод ограничивает возможности дешифрирования подводного рельефа. Отбираются снимки, полученные при минимальной мутности, а в случае распространения мутных вод сопоставляются одновременные снимки для отделения изображения изменчивых мутных вод от более стабильных донных объектов; применяется разновременный цветовой синтез. Выделение песчаных отмелей, форм грядового рельефа на них, контуров подводных русел выполняется прямым дешифрированием по вариациям яркости изображения в красной зоне. Для выявления песчано-илистых и илистых отмелей используется индикационное дешифрирование по распространению на илистых отложениях водной растительности. Для выделения нечетких границ между отмелями и стрежневыми зонами потоков применяется яркостное квантование снимков. Сопоставление составленной по современным снимкам карты отмелей дельты Енисея с топографическими и лоцманскими картами 1970–1980-х гг. показывает сокращение площади отмелей, примыкающих к оголовкам крупных островов восточной части дельты, что находится в соответствии с выявленной ранее авторами статьи активизацией размыва берегов рукавов дельты Енисея в XXI в.

Ключевые слова: отмели, уровень воды, песок, ил, водная растительность, стрежневая зона, космические снимки.

DOI: 10.31857/S0321059621040106

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающая роль Северного морского пути в условиях потепления климата вызывает повышенный интерес к исследованиям дельт северных рек, представляющих замыкающие звенья выхода водного транспорта к океану. Такие исследования на основе анализа разновременных космических снимков, выполненные в последние годы в Московском государственном университете на примере дельт рек Лены и Енисея, показали, что в условиях возрастания количества осадков в бас-

сейнах рек и увеличения объема их стока наблюдается определенная активизация процессов размыва морского края дельт (подобно отступанию морских берегов, сложенных мерзлыми породами, в связи с деградацией мерзлоты). Так, в дельте р. Лены, для которой характерно стабильное состояние морского края на почти полном (97%) его протяжении, выявлен размыв наименее многоводных рукавов в районах выхода к морю [5]. В дельте р. Енисей, которая во второй половине XX в. продолжала медленно выдвигаться в Енисейский залив [6], в первые десятилетия XXI в. выявлено преобладание процессов размыва эстуарного края и берегов рукавов над локально на-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-05-60221).

блюдавшимися процессами аккумуляции отложений (при 9-кратном превышении площадей размыва над площадями аккумуляции) [4].

В целом преобладание процессов размыва берегов над процессами аккумуляции отложений благоприятно для условий судоходства. Однако чрезвычайно важно проследить пути перемещения и отложения продуктов размыва, влияние усиления эрозии берегов на распространение отмелей, поскольку именно они на Енисее определяют условия судоходства. Поэтому изучение динамики дельты р. Енисей по космическим снимкам продолжено в направлении картографирования отмелей. По современным космическим снимкам со спутника “Sentinel-2” составлена карта распространения отмелей в дельте р. Енисей (рис. 1), на которой прирусловые отмели разделены по составу слагающих их отложений на песчаные, песчано-илистые и илистые, показаны участки сформировавшегося на них грядового рельефа, выраженные в донном рельефе подводные продолжения русел, выделены стрежневые зоны потоков, показано распределение водной растительности.

Полученный в процессе этой работы опыт использования космических снимков для исследования подводного рельефа высветил ряд возникающих при этом методических проблем, связанных с глубиной проникновения в воду солнечного излучения разных спектральных диапазонов, спектральными отражательными свойствами подводных объектов, влиянием на дешифрирование снимков колебаний уровня и мутности вод, нечеткостью границ объектов под слоем воды, ограниченными возможностями прямого визуального дешифрирования, применением индикационно-го дешифрирования, в частности – определения состава слагающих отмели отложений по распространенной на них растительности. Предложения по решению этих методических проблем на основе конкретного опыта картографирования отмелей в дельте Енисея по космическим снимкам и составляют задачу настоящей статьи.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Енисей – самая многоводная река России со средним годовым объемом водного стока в замыкающем створе 630 км³/год [9], но относительно малым стоком наносов – 6.4 млн т/год [8], что объясняется особенностями бассейна, большая часть которого расположена в лесной зоне, а также зарегулированностью стока водохранилищами. Получая в основном снеговое питание, Енисей имеет высокое и продолжительное весенне-летнее половодье, летне-осенние паводки и осенне-зимнюю межень. Устьевая область Енисея включает в себя собственно дельту протяженностью

200 км и площадью 7.5 тыс. км² и ее устьевое взморье в южной части Енисейского залива Карского моря с устьевым баром в районе Сопочной Карги, образующие эстуарно-дельтовую систему [3]. Здесь формируется дельта выполнения эстуарного залива. Верхняя часть дельты, начинающейся у мыса Крестовского, еще не имеет разветвленных рукавов, но после мыса Лопатки следует Танамомунгуйское расширение до 77 км, где происходит сложное разветвление Енисея на широкие и глубокие рукава Малый Енисей, Большой Енисей и Каменный Енисей, получающие большую часть стока (Малый Енисей 23%, Большой Енисей вместе с Каменным Енисеем 70%) и образующие наиболее многоводную восточную часть дельты. Центральная часть дельты представляет собой архипелаг Больших Бреховских островов, разделенных мелководными протоками. В западной части дельты Дерябинский Енисей, образующийся после слияния левобережных протоков, представляет собой широкий, но не глубокий рукав, формирующий вблизи эстуарного края частное дельтовое разветвление. Вдоль берегов основных рукавов и вокруг островов, разделяющих рукава, почти повсеместно протягиваются прирусловые отмели, частично освоенные водной растительностью.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для картографирования распространения отмелей в дельте Енисея использованы снимки со спутника Европейского космического агентства “Sentinel-2”, которые стали поступать с 2015 г. Их охват (290 км) обеспечивает изображение всей дельты на одном снимке. Сканирующая система MSI ведет съемку в 12 каналах видимого, ближнего (NIR) и среднего инфракрасного (так называемого коротковолнового SWIR) диапазонов с разрешением от 10 до 60 м (табл. 1). Используемые для дешифрирования подводных объектов каналы видимого диапазона имеют достаточно высокое разрешение – 10 м. Благодаря работе на одной орбите двух спутников “Sentinel-2”, разнесенных на 180°, обеспечивается повторяемость съемки через 5 сут, что особенно важно для северных районов с их сложными погодными условиями. Открытый доступ к снимкам с атмосферной коррекцией обеспечен через архивы Европейского космического агентства ESA и Геологической службы США USGS. Отобраны безоблачные снимки после спада половодья.

В качестве опорных служили июльские снимки 2017 и 2019 гг., снимки за другие даты межженного периода использованы для учета мутности вод, развития водной растительности. Для обоснования дешифровочных признаков отмелей и для проверки результатов дешифрирования использованы картографические материа-



Рис. 1. Карта отмелей в дельте Енисея: 1 – повышенные обсыхающие участки отмелей; 2 – песчаные прирусловые отмели и повышенные участки отмелей в эстуарии; 3 – песчано-илистые и илистые прирусловые и эстуарные отмели; 4 – грядовый рельеф на поверхности отмелей; 5 – бровки размыва отмелей; 6 – устьевые бороздины; 7 – стрежневые зоны потоков; 8 – продолжения стрежневых зон потоков в эстуарии; 9 – водная растительность с плавающими листьями; 10 – погруженная водная растительность.

лы: обзорно-топографическая карта 1984 г. масштаба 1 : 200 000, где даны изобаты 2, 5, 10 м и особым знаком (без четкого оконтуривания) показано распространение песчаных отмелей; карты русла р. Енисей (раньше они назывались лоцманскими) масштаба 1 : 100 000 на восточную часть дельты, на которых даны отметки глубин, проведены изобаты 5, 10 м, указаны участки распространения песков и водной растительности [10].

Данные гидрологических наблюдений получены из “Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных

объектов” (АИС ГМВО) [11]. В качестве опорного гидрологического поста (г.п.) выбран ближайший к устьевой части действующий г.п. р. Енисей – с. Караул (Среднесибирское УГМС), расположенный на расстоянии 253 км от устья Енисея.

Информация, необходимая для анализа направления, скорости и продолжительности ветров в периоды, предшествующие датам получения космических снимков, отобраны на интернет-ресурсе “Погода и Климат” [15], где размещены данные с метеорологической станции с. Караул.

Таблица 1. Характеристики спектральных каналов спутника “Sentinel-2” (MSI)

№ спектрального канала	Длина волны, мкм	Разрешение, м
Канал 1 “Coastal aerosol”	0.43–0.45	60
Канал 2 “Blue”	0.46–0.53	10
Канал 3 “Green”	0.54–0.58	10
Канал 4 “Red”	0.65–0.68	10
Канал 5 “Vegetation Red Edge”	0.70–0.71	20
Канал 6 “Vegetation Red Edge”	0.73–0.75	20
Канал 7 “Vegetation Red Edge”	0.77–0.79	20
Канал 8 “NIR”	0.78–0.89	10
Канал 8a “Narrow NIR”	0.85–0.88	20
Канал 9 “Water vapour”	0.93–0.95	60
Канал 10 “SWIR–Cirrus”	1.36–1.39	60
Канал 11 “SWIR1”	1.56–1.66	20
Канал 12 “SWIR2”	2.09–2.28	20

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЕ

Возможности исследования подводных объектов в настоящее время расширяются в связи с увеличением пространственного разрешения космических снимков и числа применяемых для съемки спектральных каналов, среди которых появляются каналы, специально предназначенные для съемки береговой зоны. Это, например, каналы съемки в синей зоне, называемые “Coastal”, используемые в последние годы в съемочных системах спутников “WorldView-2”, “Landsat-8”, “Sentinel-2”. Разрабатываются методы обработки этой информации для изучения мелководий, и начато их применение. Так, для исследования подводного рельефа Бакальской банки в Чёрном море по материалам съемки “Sentinel-2” [7] использованы алгоритмы расчета глубин водных объектов по дистанционным данным – метод “Stumpf” (2003) [17] и усовершенствованный метод “Lyzenga” (2006) [15] на основе информации каналов “Green”, “Blue”, “Red”. Для применения этих методов необходима эталонная опора в виде фрагментов детальных батиметрических карт или данных прямых акустических батиметрических измерений. Не имея такой опоры, и в связи с отсутствием натурных исследований эталонных участков для автоматизированной классификации типов поверхности отмелей авторы настоящей статьи основывались главным образом на визуальном дешифрировании снимков с применением различных методических приемов. Среди них – выбор спектральной зоны, оптимальной для дешифрирования по прямым яркостным признакам; применение косвенного индикационного дешифрирования, например для определения вещественного состава отмелей по растительности; использование разносезонных снимков для де-

шифрирования подводной растительности; применение яркостного квантования снимков для более четкого выделения границ отмелей; цветовой синтез разновременных снимков и др. При использовании столь широкого спектра приемов дешифрирования подводных объектов исследователи встречаются с целым набором методических проблем, рассматриваемых ниже.

Глубина проникновения в воду лучей разных спектральных диапазонов

Возможности применения многозональной съемки в исследованиях подводного рельефа береговой зоны связаны в первую очередь с проникновением солнечного излучения разных спектральных диапазонов на разную глубину.

Уже в первые годы появления многозональной космической съемки была выполнена оценка возможностей применения спутников “Landsat” в исследованиях морей. В связи с этим проведены подспутниковые наблюдения в Нью-Йоркской бухте [14], на основе которых выявлены возможности использования снимков в различных зонах электромагнитного спектра для изучения водных объектов. Наибольшее проникновение в водную толщу солнечного света наблюдается для лучей коротковолновой части видимого диапазона. Для прозрачных вод при отсутствии взвесей и фитопланктона глубина проникновения сине-зеленых лучей достигает 50 м. Однако общее снижение контраста изображения на космических снимках из-за влияния атмосферной дымки не позволяет достаточно эффективно использовать снимки в синей зоне. Лучи зеленой зоны, признанной наилучшей для съемок воды и в воде [16], проникают в условиях чистой воды на глубину >20 м (рис. 2); такое проникновение характерно для канала 0.5–

0.6 мкм спутника “Landsat”. В красной зоне глубина проникновения в воду солнечных лучей уменьшается до 12–15 м (для канала 0.6–0.7 мкм) и 5–7 м (для канала 0.7–0.8 мкм). Проникновение лучей в ближней инфракрасной зоне (0.8–1.1 мкм) измеряется сантиметрами, и объекты на дне или в водной среде на снимках в этой зоне не отображаются, видны лишь объекты, находящиеся на поверхности воды или выступающие из-под воды.

Такая ориентировочная оценка глубины проникновения в воду света и, соответственно, возможности отображения на снимках объектов, находящихся на разной глубине, выполненная экспериментально в связи с оценкой снимков “Landsat”, сохраняется и для снимков со спутника “Sentinel-2”, используемых в данной работе. Об этом свидетельствуют полученные по снимкам с этого спутника кривые спектральной яркости исследуемых подводных объектов.

Анализ кривых спектральной яркости и выбор оптимальных каналов съемки

На рис. 3 приведены построенные по снимкам “Sentinel-2” кривые спектральной яркости основных объектов, отображенных на карте отмелей (для отмелей — по снимку 18 июля 2019 г., для растительности — 14 августа 2019 г.) Анализ этих кривых позволяет выделить спектральные зоны, оптимальные для дешифрирования определенных видов отмелей, и предложить пути разделения изображения объектов, близких по яркости. Верхние участки отмелей, при сгонах и в межень выступающие над водой и обсыхающие, имеют максимальную яркость во всех зонах, но особенно резкое ее повышение, выделяющее эти участки среди всех объектов, изобразившихся на снимке, характерно для канала “SWIR-1”. Для кривых прирусловых отмелей всех видов (песчаных, песчано-илистых и илистых), а также отмелей в эстуарии характерно постепенное увеличение яркости от голубой зоны к зеленой и красной и резкое снижение в ближней инфракрасной зоне. Наибольшие различия яркости разных видов прирусловых отмелей наблюдаются в красной зоне (100–150 усл. ед. ярк.), которую по этому признаку и следует использовать для разделения песчаных, песчано-илистых и илистых отмелей. Однако при этом песчано-илистые прирусловые отмели близки по яркости к отмелям в эстуарии, и для их разделения используется местонахождение отмелей (в русле или эстуарии). Илистые отмели близки по яркости к водам стрежневых зон потоков в руслах и в их продолжениях в эстуарии. Поэтому на цветном синтезированном снимке и на снимке в красной зоне илистые отмели почти не выделяются и очень слабо отличаются от стрежневых зон. Наибольшие различия их яркости в

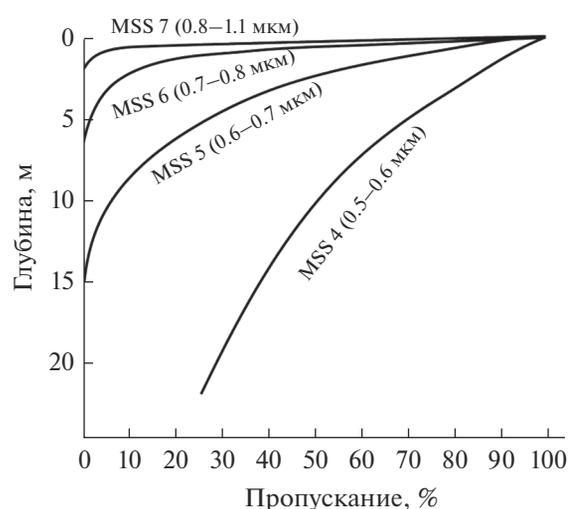


Рис. 2. Глубина проникновения в воду солнечных лучей разных спектральных диапазонов съемочной системы MSS спутника “Landsat” (по [14]).

красной зоне составляют 50 усл. ед. ярк., что плохо воспринимается глазом при визуальном дешифрировании, но потенциально они могут быть выделены при яркостном квантовании снимков; этот прием будет рассмотрен ниже.

Однако для разделения близких по яркости илистых отмелей и стрежневых зон в дельте Енисея удастся использовать дополнительно освоенную яркость илистых и песчано-илистых отмелей водной растительностью. В красной зоне растительность имеет малую яркость, изображается темным тоном, как и илистый грунт, но в ближней инфракрасной зоне яркость растительности резко увеличивается, на фоне темных песчано-илистых отмелей хорошо выделяются ее светлые контуры, которые отличает четко выраженная мелкопятнистая структура, нехарактерная для других подводных объектов.

Этот признак — поселение водной растительности на илистых отложениях отмелей — оказывается чрезвычайно полезным для проверки правильности выделения песчано-илистых и илистых отмелей по уровням яркости при квантовании снимков на участках, не обеспеченных данными о глубинах (лоцманские батиметрические карты охватывают лишь восточную часть дельты, и на топографических картах изобаты даны лишь для русел восточной части дельты).

Предложенные на основе анализа кривых спектральной яркости методы выявления различных элементов подводного рельефа реализуются лишь на снимках с хорошим отображением всего набора картографируемых объектов. Для наилучшего изображения подводного рельефа толщина слоя воды над ним должна быть минимальной, а сами водные массы достаточно прозрачными.

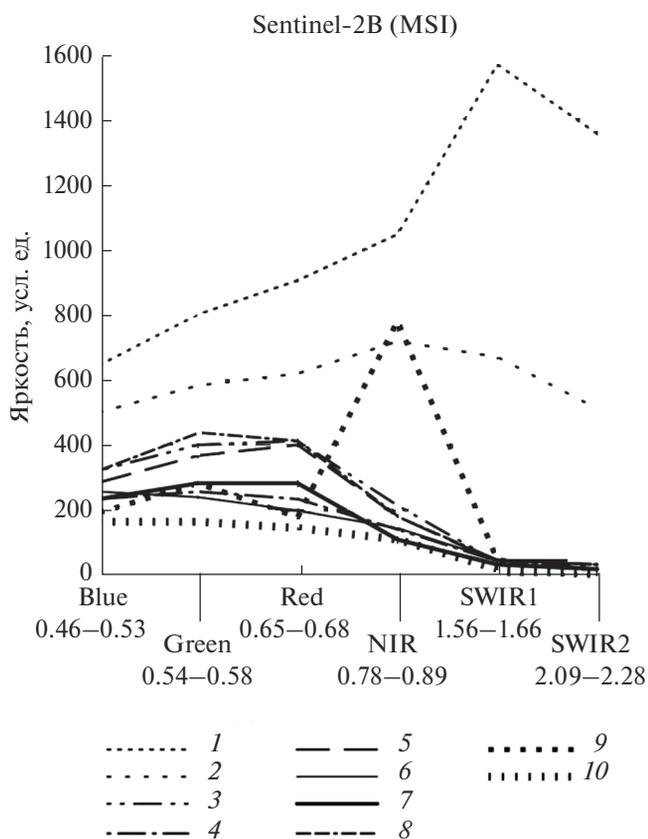


Рис. 3. Кривые спектральной яркости исследуемых объектов по данным съемки “Sentinel-2”. 1 – повышенные обсыхающие участки отмелей; 2 – прирусловые песчаные отмели; 3 – песчано-илистые отмели; 4 – илистые отмели; 5 – отмели в эстуарии; 6 – стрежневые зоны потоков; 7 – продолжения стрежневых зон потоков в эстуарии; 8 – участки повышенной мутности вод; 9 – водная растительность с плавающими листьями; 10 – погруженная водная растительность.

Возникают проблемы учета колебаний уровня воды и мутности вод.

Колебания уровня воды

При выборе снимков для исследования подводных объектов главное условие, помимо отсутствия облачности, – минимальная толщина водного слоя. Поэтому выбираются снимки, полученные в меженный период. Снеговое питание Енисея обуславливает пик весеннего половодья в мае–июне, устойчивая межень устанавливается с конца июля, но уже в сентябре–октябре помехой становится снежный покров. Погодные условия, экранирование облачностью резко сокращают возможности выбора снимков в этот короткий период. Приливные колебания уровня в Енисейском заливе незначительны (0.3 м у Сопочной Карги), но возможны нагоны, достигающие у за-

падного эстуарного края дельты 1–2 м [3]. Чтобы исключить влияние возможных сгонно-нагонных колебаний уровня, для выбранных безоблачных снимков с помощью информационной системы “Погода и Климат” [2] проверены погодные условия (ветер, осадки) в день съемки и предшествующие дни, а также проанализирована имеющаяся в открытом доступе статистика уровня воды с июля по сентябрь 2008–2017 гг. [11]. В течение суток, предшествовавших дате съемки 18 июля 2017 г., по данным метеостанции с. Караул, скорость преобладавшего ранее северного ветра снизилась до 2 м/с, а в день съемки с 0 до 3 ч отмечен штиль. Отметки уровня воды 198 см, зафиксированные на г.п. р. Енисей – с. Караул 18.07.2017, превышают средний многолетний уровень 192 см на эту дату незначительно (на 6 см) и средний многолетний уровень 183 см в августе (самый маловодный период межени) на 15 см. Эти данные свидетельствуют об отсутствии влияния нагонных процессов на уровень воды 18.07.2017.

Так как в открытых источниках отсутствуют данные об уровне воды в р. Енисей в 2019 г., влияние нагонных процессов на даты 18.07.2019, 14.08.2019 и 01.09.2019 оценивалось на основе данных о скорости и направлении ветра накануне съемки, среднестатистических данных об уровне воды на эти даты в 2008–2017 гг. и путем сравнения планового положения береговой линии на снимке 18.07.2017 с положением ее на снимках 18.07.2019, 14.08.2019 и 01.09.2019.

17 июля 2019 г. преобладал ветер северо-восточного направления со средней скоростью 8 м/с, который с 0 ч 18 июля сменился восточным ветром со скоростью 6 м/с. 13 и 14 августа 2019 г. зафиксирован переменный ветер от северного до юго-западного направления со скоростью 2–3 м/с, чередующийся со штилем. Во второй половине дня 31 августа 2019 г. восточный ветер со скоростью 5–6 м/с сменился ветром северо-восточного направления (10 м/с). С 0 ч 1 сентября наблюдался штиль, а затем восточный, северо-восточный ветер (3–4 м/с) (табл. 2). Сравнение снимков 18.07.2017 со снимками 18.07.2019, 14.08.2019 и 01.09.2019 показало, что уровень воды в эти дни в 2019 г. был практически одинаковым и несколько ниже, чем 18.07.2017 г. На основе этих данных можно считать, что сгонно-нагонные процессы в указанные дни 2019 г. также не оказывали существенного влияния на уровень воды.

Кроме этих сезонных, периодических и случайных колебаний уровня необходимо учитывать межгодовые колебания, зависящие от погодной ситуации в бассейне реки в конкретный год. На рис. 4 приведены графики изменений уровня Енисея по данным г.п. р. Енисей – с. Караул за летние месяцы с 2008 по 2017 г., показывающие

значительные межгодовые колебания уровня воды [11]. Они проясняют причину различий отображений отмелей на снимках, полученных в 2017 г. (на которых хорошо видны прирусловые песчаные отмели, а песчано-илистые и илистые почти не просматриваются), и на снимках 2019 г. (где отобразились все виды прирусловых отмелей и лучше выделяются стрежневые зоны потоков между отмелями). Опыт картографирования отмелей в дельте Енисея показал, что наряду с опорными для дешифрирования снимками при минимальном уровне воды полезно использовать и снимки при более высоком уровне, сравнение с которыми открывает некоторую возможность разноглубинного дешифрирования. В рассматриваемом случае по снимкам 2017 г., полученным при более высоком уровне воды, лучше выделялись светлые песчаные отмели; а снимки 2019 г., очевидно полученные при минимальном уровне воды, позволили выявить также более темные и углубленные песчано-илистые и илистые отмели и выделить между ними стрежневые зоны потоков в руслах.

Мутность вод

Один из главных факторов, осложняющих изучение и картографирование подводных объектов по космическим снимкам, — мутность вод. Струи воды разной мутности имеют повышенную яркость и формируют на снимке плавный извилистый рисунок, который можно принять за изображение мелководного рельефа дна. Главный метод для решения — рельеф дна или мутные воды — использование разновременных снимков, полученных с небольшим временным интерва-

Таблица 2. Направление и скорость ветра за сутки до даты съемки

Дата	Направление ветра	Скорость ветра, м/с
17.07.2019	СВ	6–12
18.07.2019	В	6–8
13.08.2019	Штиль	0
	З,	2
	С, СВ	3–4
14.08.2019	Штиль	0
	С	2
	Штиль	0
	ЮЗ	1
31.08.2019	В	4–10
	СВ	9–13
01.09.2019	Штиль	0
	В	3
	СВ	4

лом. Потоки мутных вод изменчивы во времени, а донные объекты более постоянны.

Енисей относится к рекам с относительно малой мутностью вод. Основной сток наносов Енисея формируется в верхней части бассейна выше Красноярского водохранилища. В лесной зоне поверхностный смыв незначителен. Слабо развита здесь и русловая эрозия, поскольку левобережные притоки имеют небольшие уклоны, а правобережные притоки дренируют в основном территории, сложенные преимущественно кристаллическими породами. Поэтому мутность воды и сток взвешенных наносов Енисея сравнительно малы,

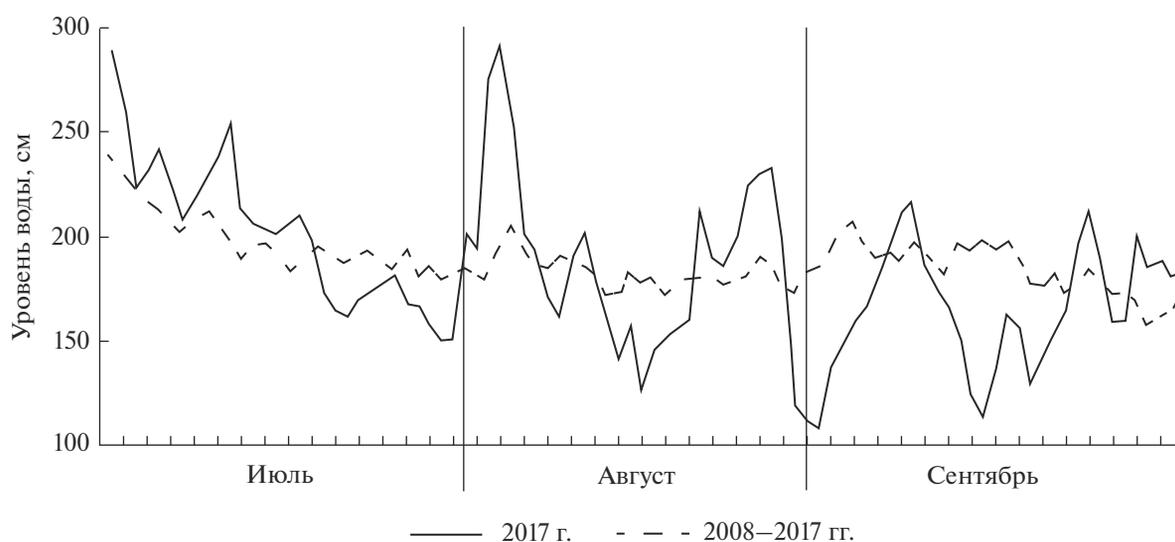


Рис. 4. Колебания уровня воды в приустьевой зоне Енисея в июле–сентябре 2008–2017 гг. по данным г.п. р. Енисей — с. Караул.

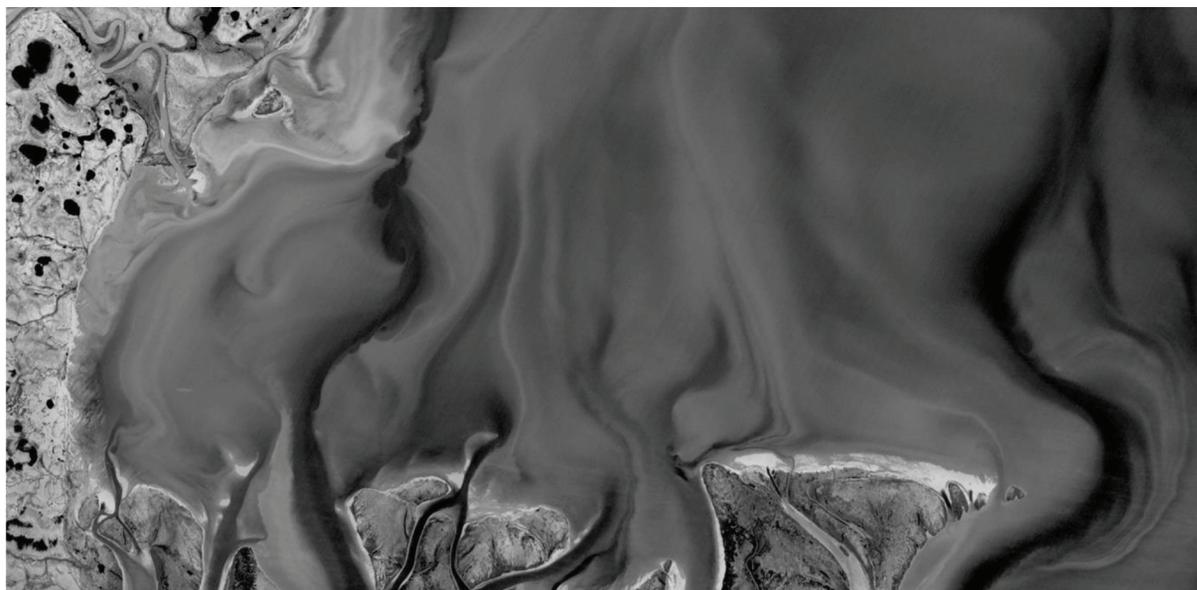


Рис. 5. Продолжения стрежневых зон потоков западной части дельты в мутных водах мелководного эстуария.

особенно в зарегулированных условиях [1]. Согласно карте “Средней мутности рек СССР” [12], средняя мутность вод Енисея – 22 г/м^3 , а его бассейн отнесен к зонам малой мутности ($10\text{--}25 \text{ г/м}^3$). Это определяет хорошие перспективы изучения по снимкам подводного рельефа почти по всем рукавам дельты Енисея. Однако в низовьях в дельту впадает слева приток – небольшая р. Танама, которая, протекая по позднеплейстоценовой (каргинской) озерно-аллювиальной равнине [3] и размывая ее мерзлые породы, приносит значительное количество взвесей в рук. Дерябинский Енисей, образованный при слиянии проток Широкой, Толстая Земля и впадающей в дельту р. Танама. Распространение этих взвесей по рукаву в разные даты съемки не одинаково.

На снимке 18 июля 2017 г. шлейф приносимых Танамой мутных вод “срезается” потоком из впадающей в Дерябинский Енисей прот. Охотской и ниже по течению не распространяется; прирусловые отмели у левого берега Дерябинского Енисея видны достаточно хорошо, просматривается полосчатая структура осложняющих их форм грядового рельефа. Однако на снимках 3, 5, 17, 18 июля 2019 г. светлый поток приносимых Танамой мутных вод шириной 1–2 км тянется вдоль левого берега Дерябинского Енисея вплоть до его устьевого створа и нижние границы прирусловых песчаных отмелей видны плохо. Но этот мутный поток в указанные даты пока не попадает в другие рукава дельтового разветвления Дерябинского Енисея. Однако на снимке 20 июля 2019 г. приносимые Танамой мутные воды распространяются уже во все рукава частной Дерябинской дельты.

На эстуарном крае дельты ниже устьевых створов рукавов в мелководном эстуарии – Енисейском заливе – сложный рисунок плавно изгибающихся светлых и темных полос может быть обусловлен как донным рельефом отмелей, так и потоками вод разной мутности. На снимке 18 июля 2017 г., когда мутные воды Танама не распространялись по рукавам Дерябинского Енисея и не достигали их устьев, в мелководном эстуарии слабо выделяются светлыми пятнами повышенные участки песчаных отмелей (для более четкого их оконтуривания использовано яркостное квантование снимка в красной зоне, этот прием охарактеризован ниже). В противоположность этому на снимках 3–18 июля 2019 г., когда мутные воды Танама доходили до эстуария по левому рукаву Дерябинского Енисея, а 20 июля 2019 г. распространялись по всем рукавам Дерябинского устьевого разветвления, на снимках сформировалась сложная и изменчивая во времени картина потоков мутных вод в эстуарии (рис. 5). Хотя направление их движения и определяется рельефом, но сам рельеф дна этими потоками скрыт.

Дифференцированный подход к разным районам дельты

Из приведенных примеров ясно, что в разных районах дельты влияние мутности вод на дешифрирование отмелей оказывается разным, и приходится учитывать этот фактор по-разному – в восточной части дельты (с крупными рукавами глубиной 10–15 м, получающими основной поток относительно прозрачных вод), в ее западной части (с более мелким (4–6 м) Дерябинским Енисе-

ем и впадающим сюда приносящим взвеси при-
током Танамай) и в мелководном (2–3 м) эстуа-
рии – Енисейском заливе.

В широкие рукава восточной части дельты по-
ступает основной поток относительно прозрач-
ных вод. При дешифрировании отмелей, примы-
кающих к островам Лопатному и Турушин в
Большом Енисее, и отмелей вокруг островов Ва-
сильевского, Чаечного, Судного, разделяющих
рукава Большой Енисей и Каменный Енисей,
сталкиваемся с тем, что при всегда достаточно хо-
рошем отображении светлых песчаных отмелей
более темные песчано-илистые и илистые отмели
видны хуже, для их дешифрирования необходим
поиск снимков, сделанных в идеальных условиях
при минимальном уровне воды и малой мутно-
сти, когда отображаются и эти формы, обычно
выделяющиеся не столь четко.

В западной части дельты, в рукавах Дерябин-
ского Енисея, где мутные воды не только ухудша-
ют условия наблюдения, но могут оказывать ис-
кажающее влияние (рисунок мутных вод может
быть принят за структуры донного рельефа),
необходимо использовать снимки за те даты, ко-
гда мутные воды Танама не распространяются
по Дерябинскому Енисею. Поскольку опасность
ошибочного дешифрирования сохраняется, не-
обходимы дополнительные средства контроля
правильности его результатов. В данном случае
для проверки оказалось эффективным привлече-
ние снимков, на которых отобразилась подвод-
ная растительность, поселяющаяся на илистых
отложениях отмелей. Сами контуры отмелей, их
границы на этих снимках видны плохо, но нали-
чие водной растительности подтверждает пра-
вильность отнесения выделенных по раннелетне-
му снимку контуров именно к отмелям, а не к
структурам мутных потоков.

Третий, наиболее проблематичный, район –
мелководья эстуария. Здесь для выделения повы-
шенных песчаных участков отмелей, слабо замет-
ных на снимках 18 июля 2017 г. с относительно
прозрачными водами, выполнено яркостное
квантование снимка в красной зоне с предвари-
тельным построением яркостных профилей.

Для определения продолжения на мелководье
стречневых зон потоков из рукавов, впадающих в
залив, которые темными полосами выделяются
на рис. 5, использован синтез разновременных
снимков (18 июля, 14 августа, 1 сентября 2019 г.),
передающих различающуюся для каждой даты
картину изменчивых потоков мутных вод. На
цветном синтезированном изображении черным
цветом выделились участки стречневых зон,
функционировавших во все три срока наблюде-
ния, т. е. наиболее устойчивых, которые и показаны
на карте (рис. 1) как продолжения стречневых
зон потоков в мелководном эстуарии, а неопреде-

ленное размытое изображение с пятнами разного
цвета на синтезированном снимке отражает из-
менчивую ситуацию потоков мутных вод.

Водная растительность

На отмелях в дельте Енисея произрастает вод-
ная растительность. Это макрофиты – разные ви-
ды рдестов – водных трав с ползучими корневи-
щами и листьями – нижними, полностью погру-
женными в воду, и верхними, плавающими на
поверхности. Рдест подсибирский (*P. Subsibiricus*) –
эндемик и описан на Никандровском острове в
дельте Енисея. Длина его стебля ~50 см соизме-
рима с глубинами на отмелях. Другой вид – рдест
стеблеобъемлющий (*P. Perfoliatus*) – имеет корне-
вища с длинными ползучими побегами до 6 м
длиной, нередко образует заросли, затрудняющие
движение судов [13]. Местообитания рдестов и
других водных растений приурочены к илистым
грунтам и гораздо реже охватывают песчаные.

Водная растительность мелководий находит
отображение на космических снимках со спутни-
ка “Sentinel-2”. В начале лета после спада полово-
дья она изображается на цветном снимке, синте-
зированном в варианте “с естественной цветопе-
редачей” (RGB: 4,3,2), коричневато-зеленоватым
цветом, структура изображения аморфная. На зо-
нальных снимках в этот период для нее характер-
ен темный тон изображения в красной зоне и бо-
лее светлый серый в ближней инфракрасной, где
она имеет слабо выраженную пятнистую структу-
ру. В конце лета, когда рдесты получают полное
развитие и их верхние листья выходят на водную
поверхность, они очень четко отображаются на
цветных синтезированных с естественной цвето-
передачей снимках, имеют яркий зеленый цвет и
четко выраженную крупнопятнистую структуру
изображения. При сравнении зональных сним-
ков темный тон их изображения в красной зоне
меняется яркими белыми пятнами в ближней
инфракрасной зоне (рис. 6).

Такое четкое отображение побудило включить
растительность в число дешифрируемых объек-
тов при картографировании отмелей. Ее отобра-
жение на карте играет двойную роль. Во-первых,
карта показывает распространение растительно-
сти как возможное осложнение при движении су-
дов. Во-вторых, распределение растительности
используется как индикатор правильности де-
шифрирования песчано-илистых и илистых от-
мелей, а ее распространение помогает определить
нижние границы илистых отмелей, выделить на
контакте с ними стречневые зоны потоков. При
этом важно использовать снимки за разные даты
вегетационного периода.

На снимке 18 июля 2019 г. в красной зоне хоро-
шо выделяются светлые контуры песчаных и пес-

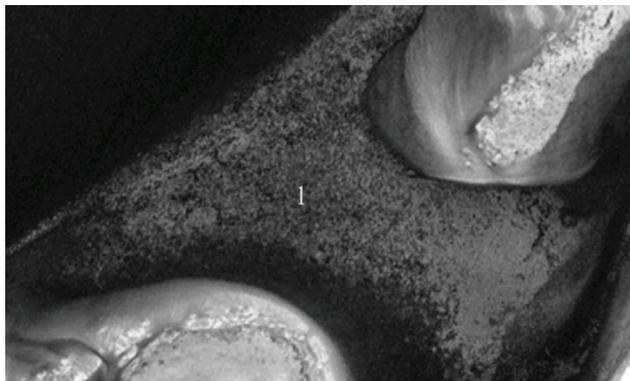


Рис. 6. Водная растительность с плавающими листьями (1) на снимке в ближней инфракрасной зоне со спутника “Sentinel-2” 14.08.2019.

чано-илистых отмелей и менее четко просматриваются илистые отмели. Водная растительность в это время еще не получила полного развития, на цветном синтезированном снимке видны ее неясные зеленоватые контуры.

В середине августа водная растительность получает максимальное развитие, верхние листья растений выходят на водную поверхность, и на снимке 14 августа 2019 г. она изображается ярко зеленым цветом и имеет четко выраженную пятнистую структуру изображения, отличающую ее от других донных объектов (рис. 6). Поэтому для проверки правильности дешифрирования по июльскому снимку илистых и песчано-илистых отмелей используется августовский снимок.

В сентябре заросли рдестов с плавающими листьями выделяются не столь четко, но получает максимальное распространение погруженная донная растительность, по которой и выделяются нижние границы илистых отмелей. Таким обра-

зом, по каждому из снимков, полученных в разные даты вегетационного периода, решаются свои задачи, что еще раз подтверждает необходимость использования не одного опорного снимка, а серии снимков.

Проблема нечетких границ и яркостное квантование снимков

На снимках в красной зоне, оптимальной для дешифрирования подводных объектов, хорошо выделяются светлые полосы прирусловых отмелей, протягивающиеся вдоль берегов большинства рукавов. Сопоставление снимков с лоцманскими картами, где на многих из этих участков показаны пески, свидетельствует о том, что это песчаные отмели. Вариации яркости, рисунок изображения позволяют при дешифрировании выделить на этих отмелях участки развития грядового рельефа, бровки размыва нижних краев прирусловых отмелей, устьевые бороздины (рис. 7).

Однако границы части песчаных отмелей, особенно — расположенных посреди русла, нечеткие; в частности, это относится к банкам Неупокоева и Вилькицкого, отмеченным на топографических и лоцманских картах. Недостаточная четкость характерна и для границ песчано-илистых и особенно — илистых отмелей, более глубоких по сравнению с песчаными и отличающихся более темным изображением. В предыдущем разделе показано значение их индикационного дешифрирования по погруженной растительности, развивающейся на илистых отложениях. По яркости изображения на снимке они слабо отделяются от стречневых зон потоков в руслах; кривые спектральной яркости этих объектов, как видно из рис. 3, очень близки. Такие трудно выявляемые отмели наиболее широко распространены по периферии крупных островов в восточной части

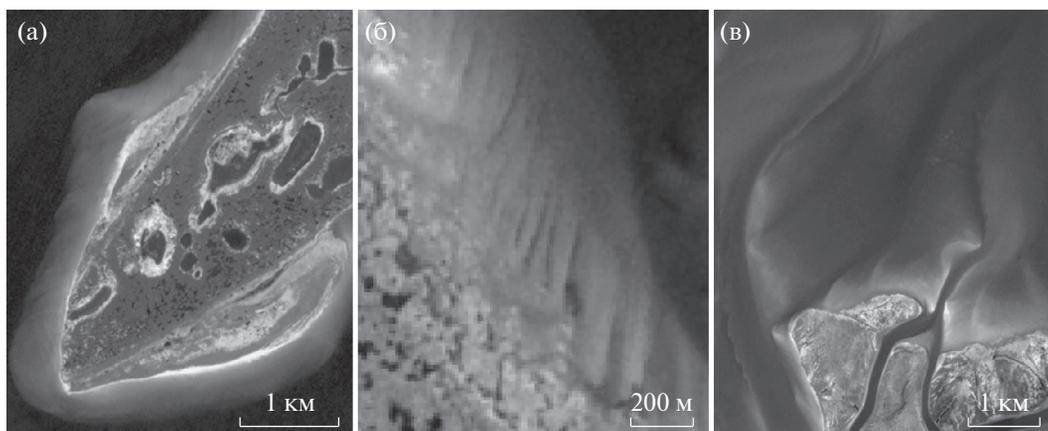


Рис. 7. Отображение форм руслового рельефа на снимке со спутника “Sentinel-2” в красной зоне: четкий нижний край прирусловой песчаной отмели — бровка размыва осью потока (а); — грядовый рельеф на поверхности песчаных отмелей (б); подводные продолжения русел в эстуарии — устьевые бороздины (в).

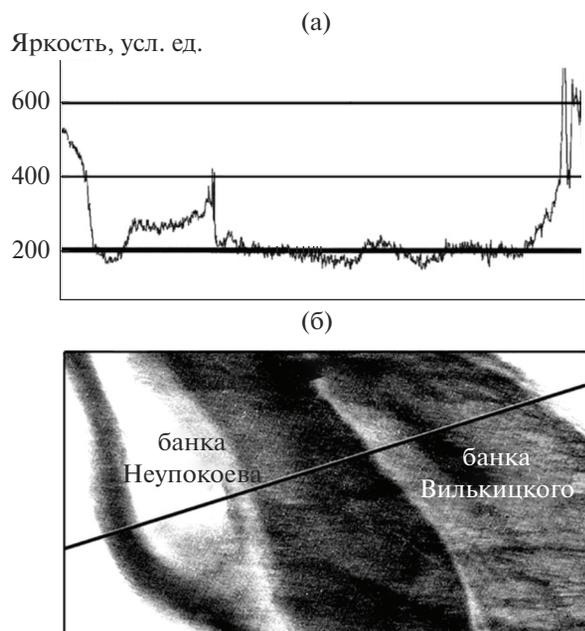


Рис. 8. Профиль изменения яркости в красной зоне через устьевой створ Енисея с банками Неупокоева и Вилькицкого для определения яркостного уровня квантования снимка (а) и результаты квантования (б).

дельты. Они примыкают к оголовкам и ухвостьям островов Лопатного, Турушин, Васильевского, Чаечного, Судного. Видимо, более темные по цвету песчано-илистые и илистые отложения, а также нередко поселяющаяся на них подводная растительность приближают яркость изображения этих отмелей к яркости более глубоких стречневых зон потоков. Но спектральные кривые все же фиксируют различия яркости этих объектов в красной зоне, поэтому потенциально могут быть выделены уровни яркости, соответствующие каждому из них. Для определения этих уровней построены графики изменения яркости на снимке по профилям, пересекающим изображения обеих форм (рис. 8). Яркостное квантование обеспечивает более обоснованное выделение нечетких границ.

Однако на графиках, построенных для различных районов дельты, уровни яркости, разделяющие илистые отмели и несколько более глубокие стречневые зоны потоков в руслах, неодинаковы. Это связано с несколькими факторами, обуславливающими различия яркости воспроизведения однотипных объектов. Главные из них — разная глубина рукавов западной, средней и восточной частей дельты и различная мутность вод в них, на что указывалось выше. Как и при учете мутности вод, здесь необходим дифференцированный подход к различным районам дельты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По современным космическим снимкам со спутника “Sentinel-2” впервые составлена карта отмелей дельты Енисея. Опыт работы над ней показал, что снимки обеспечивают исследование не только динамики дельт, размыва и аккумуляции отложений вдоль эстуарного края дельты и берегов рукавов, но и подводных прирусловых отмелей, что особенно важно с учетом роли дельт как замыкающего звена при выходе к океану, возросшую в связи с усилением внимания к Северному морскому пути.

При исследовании отмелей использованы методы прямого визуального и индикационного дешифрирования, яркостного квантования снимков для выделения нечетких границ, цветового синтеза разновременных снимков для разделения изображений мутных вод и донных объектов. При разделении отмелей по составу отложений существенную роль играет индикационное дешифрирование илистых и песчано-илистых отмелей по распространению на них подводной растительности с учетом стадии развития растений в различные сроки периода вегетации.

При выборе снимков для исследования подводных объектов важен учет глубины проникновения в воду солнечных лучей разных спектральных диапазонов, что определяет красную зону как опорную для изучения отмелей дельты и варианты цветового синтеза с ее участием.

Важный фактор выбора снимков — слой воды над отмелями; отбираются безоблачные снимки на межливный период при отсутствии нагонов и минимальном уровне; учет межгодовых колебаний уровня дает возможность разноглубинного дешифрирования. Выбираются снимки с минимальной мутностью вод для выявления структур изображения, обусловленных мутностью, выполняется анализ разновременных снимков, их цветовой синтез.

Выявлена необходимость использования наряду с опорными, оптимальными для дешифрирования также снимков, полученных в разные сроки в течение межливного периода.

Предложенные методические приемы требуют дифференцированного подхода к разным районам дельты, различающимся по структуре гидрографической сети, водности, глубине рукавов, мутности вод.

Составленная карта впервые характеризует современное распространение отмелей в дельте Енисея. Ее сопоставление с топографическими и лоцманскими картами 1970–1980-х гг. показывает сокращение площадей отмелей, примыкающих к оголовкам крупных островов восточной части дельты, что находится в соответствии с активизацией размыва берегов рукавов в первые

десятилетия XXI в., выявленной авторами в предшествующем исследовании [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В.* Поступление наносов в устья больших рек // Геоэкологическое состояние Арктического побережья России и безопасность природопользования. М.: ГЕОС, 2007. С. 165–179.
2. Архив погоды в Карауле // Погода и климат. [Электронный ресурс]. URL: <http://pogodaiklimat.ru/weather.php?id=20978> (дата обращения: 25.03.2020)
3. *Кортаев В.Н.* Очерки по геоморфологии устьевых и береговых систем. Избранные труды. М.: МГУ, геогр. фак., 2012. 540 с.
4. *Кравцова В.И., Вахнина О.В.* Исследование динамики дельты Енисея по разновременным космическим снимкам // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 1. С. 34–47.
5. *Кравцова В.И., Инюшин А.Н.* Исследование современной динамики дельты Лены по космическим снимкам // Вод. ресурсы. 2019. Т. 46. № 6. С. 567–574.
6. *Кравцова В.И., Черепанова Е.В.* Динамика дельт рек Енисея и Пура // Вод. ресурсы. 2003. Т. 30. № 3. С. 304–311.
7. *Крыленко В.В., Крыленко М.В., Алейников А.А.* Исследование подводного рельефа Бакальской банки по данным космических снимков Sentinel-2 // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. Вып. 2. С. 30–39.
8. *Магрицкий Д.В.* Антропогенные изменения величины и режима стока наносов // Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования. М.: ГЕОС, 2007. С. 179–187.
9. *Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В., Поваляшников Е.С.* Поступление воды в дельты рек и их водный баланс // Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования. М.: ГЕОС, 2007. С. 137–141.
10. Спутниковые карты // Спутниковые снимки – интересные точки на карте. [Электронный ресурс]. URL: <https://satmaps.info/> (дата обращения: 25.03.2020)
11. Среднесуточные уровни воды рек, ручьев, каналов по постам // АИС ГМВО. [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=180> (дата обращения: 25.03.2020)
12. Сток наносов, его изучение и географическое распределение / Под ред. *А.В. Караушева*. Л.: Гидрометиздат, 1977. 240 с.
13. Флора СССР. Т. 1. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. 302 с.
14. *Charnell R.L., Maul G.A.* Oceanic Observation of New York Bight by ERTS-1 // Nature. 1973. V. 242 (5398). P. 451–452.
15. *Lyzenga D.R., Malinas N.P., Tanis F.J.* Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44 (8). P. 2251–2259.
16. *Specht M., Needler D., Fritz N.* New color film for water photography penetration // Photogrammetric Engineering. 1973. V. 39. № 4. P. 359–369.
17. *Stumpf R., Holderied K., Sinclair M.* Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types // Limnol. Oceanogr. 2003. V. 48 (1). P. 547–556.