

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЯМЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АБРАЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ БЕРЕГОВ ОСТРОВА ОЛЬХОН В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

© В. А. ПЕЛЛИНЕН

Институт земной коры СО РАН, Иркутск
E-mail: vadim.a.pellinen@ya.ru

В работе рассмотрено применение прямых (тахеометрическая съемка) и дистанционных (космо- и аэрофотосъемка) методов изучения абразионно-аккумулятивных берегов. Выполнены морфометрические измерения на ключевых участках при помощи тахеометрической съемки. Отмечено влияние уровневого режима оз. Байкал и сопутствующих экзогенных рельефоформирующих процессов на динамику береговой зоны. Дешифрирование снимков, полученных при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), аэрофото- и космосъемки, позволило установить морфометрические изменения береговой линии. Сделаны выводы о применении БПЛА для исследования берегов.

Ключевые слова: абразия, аккумуляция, берег, БПЛА, остров Ольхон, озеро Байкал.

Введение. Абразионно-аккумулятивные процессы являются одним из основных природных факторов, определяющих эволюцию береговой зоны (БЗ). Перенос отложений в пределах БЗ обусловлен в основном действием волн и течений. Актуальность изучения динамики береговых процессов продиктована нарастающей антропогенной нагрузкой, особенно в густонаселенных районах. Изменение характера и скоростей аккумулятивных процессов зачастую определяется интенсивным использованием пляжей в туристических целях (строительство пирсов, отелей, отсыпка берега). В конце 1980-х гг., было выявлено, что 70 % мирового побережья претерпевает изменения из-за высокой антропогенной нагрузки [16]. При создании береговой инфраструктуры и ее управлении часто используют результаты исследования, основанные на изучении скоростей и режимов береговых процессов, полученные прямыми (т. е. обследования с помощью GPS или тахеометрическая съемка) или дистанционными (лидар, аэрофотосъемка) методами исследования БЗ. Изучение берегоформирующих процессов можно осуществлять либо на ключевых участках, характеризующих подобные берега, либо на основе данных дистанционного зондирования всего побережья исследуемого водоема. Среди первых наиболее популярными являются методы, основанные на применении, высокоточной GPS-съемки [13, 20, 24], тахеометрической съемки или наземного лазерного сканирования [22, 25]. Эти методы являются относительно недорогими и имеют хорошую точность, а именно 2—6 см по вертикали [22], однако требуют больших усилий для сопоставления обширных областей, также они не обеспечиваются ортофотопланами, которые позволяют выявить изменение конкретных элементов рельефа местности. Для мониторинга больших площадей и в более короткие интервалы времени используют данные дистанционного зондирования, такие как аэрофотоснимки [1, 8, 19, 21], спутниковые снимки, сделанные в разное время [17], или аэролидарные съемки [28, 32]. Основной недостаток этих исследований — высокая стоимость используемого оборудования. Дистанционное зондирование при помощи приборов, установленных на спутниках или самолетах, обеспечивает полезную информацию для оценки береговых процессов в глобальном и

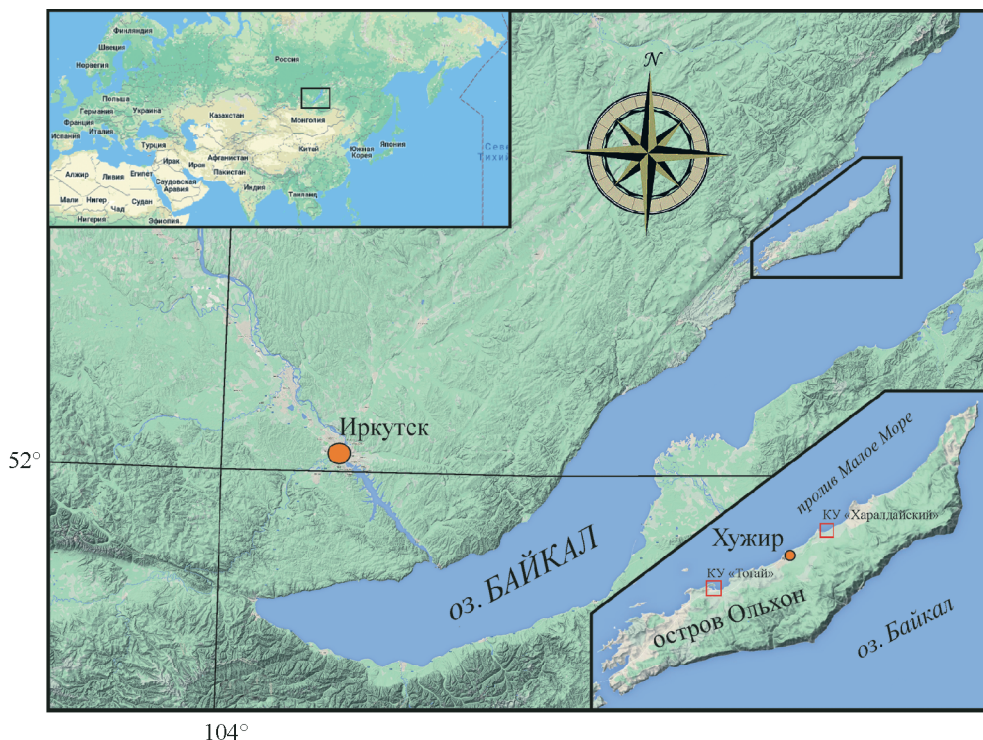


Рис. 1. Обзорная схема района исследования.

региональном масштабах [12, 31]. Остальные сопутствующие рельефоформирующие процессы должны изучаться на более локальном уровне, требующем детальных разновременных наблюдений, охватывающих короткие промежутки времени. Применение БПЛА для изучения или мониторинга береговых процессов — наиболее эффективный инструмент, а БЗ — идеальная площадка.

Цель данной работы — изучение морфологических изменений линии уреза на ключевых участках в пределах северо-западного берега о-ва Ольхон оз. Байкал с применением прямых (тахеометрическая съемка) и дистанционных (космо- и аэрофотосъемка) методов исследования.

Объект исследования. В географическом отношении о-в Ольхон имеет общее простирание на восток-северо-восток, как и его два основных побережья — северо-западное, омываемое водами пролива Малое Море, так и юго-восточное, взаимодействующие с основной акваторией озера (рис. 1). Длина береговой линии составляет 225 км. Побережье сложено разнообразными породами и характеризуется различной морфологией склонов. Природный механизм и длительный срок формирования ольхонских берегов более соответствуют морским и океаническим типам берегов, чем озерным [4]. Берега острова, как и склоны всего оз. Байкал, имеют длительную историю развития. Формирование берега происходит под влиянием ветро-волновых, геолого-структурных, геоморфологических, климатических условий, а также экзогенных процессов и колебаний уровня воды озера. Ведущим берегоформирующим фактором являются волны. Интенсивность воздействия на береговую зону волн и связанных с ними волновых течений зависит, с одной сто-

роны, от ветрового и уровня режимов, с другой — от геологического строения, конфигурации береговой линии, величины уклонов подводного берегового склона, степени насыщения береговой зоны обломочным материалом [11]. Эти условия определили формирование структурно-абразионных и абразионных типов берегов, протяженность которых достигает 220.5 км, что составляет более 98 % от длины всей береговой линии. Оставшаяся небольшая часть ольхонского побережья представлена аккумулятивными берегами.

Абразионный тип берега имеет протяженность в 124.2 км, что составляет 55.2 % от общей длины берегов о-ва Ольхон. Склоны срезают магматические и метаморфические породы раннепалеозойского возраста (граниты, пегматиты, амфиболиты, известняки и доломиты) и рыхлые отложения неоген-четвертичного возраста (глины, супеси, суглинки, пески). Береговой уступ осложняют небольшие оползни, крип, солифлюкционные деформации, осыпи и обвалы. Крутизна берегов данного типа варьируется от 8 до 70°. Ширина пляжа зависит от литологических и структурно-тектонических условий побережья.

Структурно-абразионный тип берега характерен для побережья острова, где выражены зоны разломов, синклинальные и антиклинальные складки. Берега представляют собой очень крутые вертикальные клифы, достигающие высоты 190 м. Этот тип берегов преобладает в основном на восточном берегу острова и частично на западном.

Аккумулятивный тип берегов встречается только на северо-западном побережье острова и отличается наличием вдольбереговых песчаных валов, песчано-галечных кос и пересыпей. Некоторой доле аккумулятивных берегов в центральной части острова присуще наличие процессов ветрового переноса, следствием которого являются обширные эоловые поля, материал для которых поступает из прибрежной зоны.

Побережье острова в основном подвержено ветрам, дующим с запада и востока, изредка с юго-востока; наиболее часто повторяющиеся ветра — западные. В среднем наибольшая высота волны не превышает 3 м, при подходе к берегу она уменьшается, достигая лишь 1.0—1.5 м в зоне пляжа [11]. Период штормов, когда волны достигают максимальной высоты, начинается в октябре и длится до декабря. Наиболее сильные шторма характерны для ноября.

Методы исследования. Наблюдения за берегами представляют собой комплекс прямых и дистанционных методов получения информации об изменении состояния побережья. В процессе наблюдений получают информацию режимного характера, привязанную к различным моментам физического времени [6, 15]. Наблюдение за изменением состояния геологической среды в границах БЗ осуществляется в рамках литомониторинга и подсистемы режимных наблюдений. Их цель заключается в решении проблемы оптимизации взаимодействий хозяйственной деятельности человека с геологической средой побережья [3, 23]. О взаимодействии суши с водой можно судить на основании данных измерений некоторых параметров, характеризующих динамику БЗ. В соответствии с этим ведут наблюдение за отступанием бровки берега, перестройкой аккумулятивных форм, изменением надводного и подводного профиля [5, 18]. В процессе наблюдений используют поверхностные реперы и маркеры, логгеры физического наблюдения за свойствами грунтов, геодезические и GPS-приборы, а также БПЛА. Часть приборов и приспособлений является основой дистанционных, а другая — прямых методов исследования

БЗ. Косвенные методы основаны на применении математической обработки данных, полученных в ходе космо- или аэрофотосъемки, прямые — на непосредственном измерении морфометрических параметров.

В данной работе к косвенным методам исследования относится аэрофотосъемка, выполненная с помощью БПЛА (DJI Inspire 1 pro), оснащенного камерой Zenmuse 5X, служившей для получения аэрофотоснимков с разрешением 3840×2160 пикселей. Полеты были запрограммированы при помощи программных инструментов DJI GO. Высота съемки составила 100 м над уровнем оз. Байкал. Перекрытие фотографии составило 80 %. С более подробным описанием квадрокоптера, используемого в данном исследовании, можно ознакомиться на сайте <http://www.dji.com>.

Генерация ортотрансформированных фотографий, полученных во время полетов, в цифровую модель местности была выполнена с помощью специального программного обеспечения. Эта программа выравнивает фотографии, используя алгоритм SfM (Structure from Motion) [29], который идентифицирует характерные точки, полученные с фотографий, и отслеживает их движение по всем имеющимся изображениям. Оценка положения камеры является одним из основных компонентов в SfM [20] и состоит из трех этапов. Первый этап включает в себя создание трехмерной точки, представляющей геометрию исследуемой территории; определение относительного положения камеры в момент получения изображения и внутренних параметров калибровки (фокусное расстояние, положение опорной точки, три радиальных и два тангенциальных коэффициента искажения). Эти первые шаги обработки оценивают параметры калибровки и не требуют применения дополнительной калибровки камеры и оптики на стадии получения изображения [30]. Второй этап заключается в создании плотного облака точек. При проведении съемки в прибрежной зоне большинство изображений частично покрывает вода, которая должна быть исключена из рассмотрения путем ручного удаления облака точек воды с фотографии. На третьем этапе алгоритмы работают по значениям пикселей, чтобы построить большинство геометрических деталей. Все пиксели используются в алгоритме реконструкции MVS (Multi-view Stereo) [26, 27]. Программное обеспечение, применяемое в этом алгоритме, основано на передовых компьютерных знаниях, которые позволяют создавать высококачественные ортофотоснимки и трехмерные модели из серии перекрывающихся аэрофотоснимков [49]. Далее полученные данные экспортируются в ГИС-программы (QGIS, MapInfo, ArcGis и т. п.), в которых проводится оценка морфологических изменений линии уреза.

К прямым методам исследования относятся различные морфометрические измерения [2, 10], выполняемые с помощью тахеометра, эхолота и GPS-приемника. Подобные приборы уже на протяжении многих лет используются при изучении БЗ, а их техническая эволюция отражается на частоте применения в подобных исследованиях [9]. Для измерения береговой линии и надводного профиля берега на ключевом участке использовался тахеометр Trimble TS635 (<http://www.eft-ts.ru>). Съемка проводилась в пределах определенного типа берега — на участке, отражающем все его морфогенетические особенности. Так, на выбранном участке закладывалась сеть реперов. Привязка GPS-приемника Garmin eTrex 20 (www.garmin.ru) к измеряемому профилю, плановым и высотным координатам необходима для сопоставления с результатами съемок, проведенных в другие временные отрезки. Для измере-

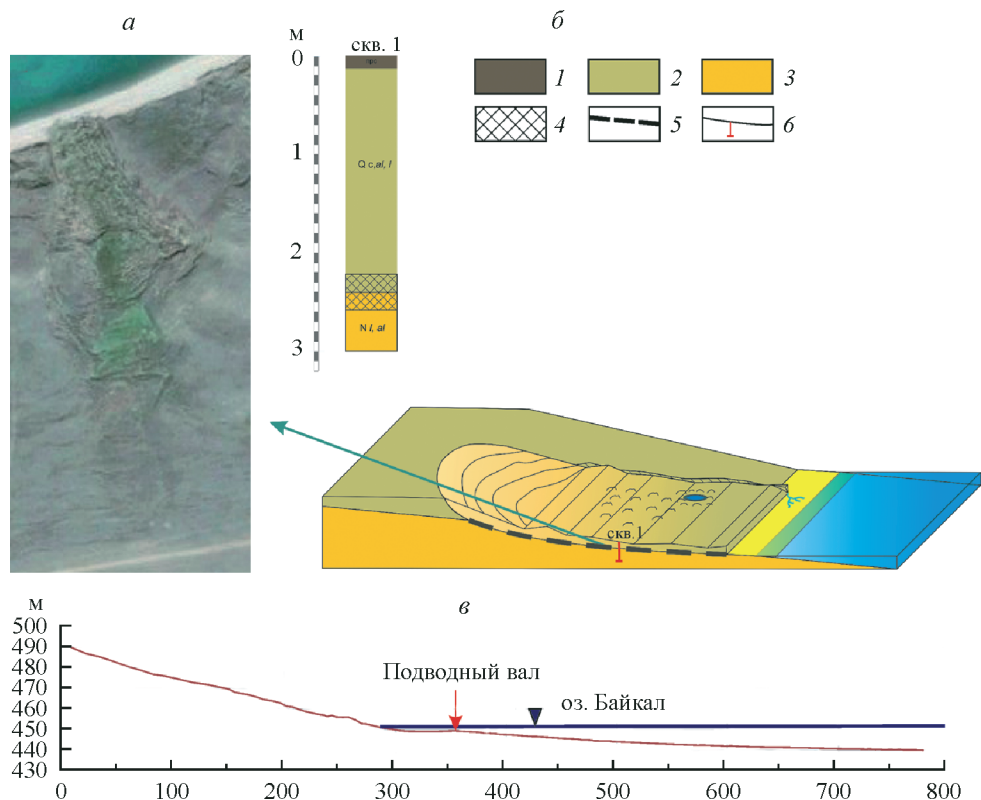


Рис. 2. Ключевой участок «Харалдайский».

а — космоснимок солифлюкционного языка Харалдайский; *б* — блок-схема солифлюкционного языка в районе залива Харалдайский: 1 — почвенно-растительный слой, 2 — четвертичные отложения, 3 — неогеновые отложения, 4 — зона скольжения оползня в скважине, 5 — линия зоны скольжения оползня, 6 — скважина. *в* — продольный профиль береговой зоны ключевого участка «Харалдайский».

ния подводного профиля берега использовался эхолот GPSmap 585 (www.garmin.ru), установленный на маломерном моторном судне. Увязка данных эхолота, тахеометра и GPS-приемника, а также их накопление и обработка осуществляется в программе Microsoft Excel.

Результаты. Участок «Харалдайский» расположен в одноименном заливе, на территории которого проводятся наблюдения за абразивно-оползновыми процессами. Территория стационара осложнена как унаследованными, так и современными солифлюкционными языками и оползнями. Склон сложен переслаивающимися толщами глин и суглинков с включениями щебня и линз песка различного генезиса неоген-четвертичного возраста (рис. 2). Деформированные склоны с длительной активной стадией смещения глинистых пород имеют четко оконтуренные корытообразные цирки со ступенями высотой до 1—2 м.

Применение прямых методов исследования. Ежегодные морфометрические измерения проводили при помощи нивелирной и тахеометрической съемки. Построенные продольные профили в период 2007—2017 гг. надводной части берега позволили установить, что динамика процесса отме-

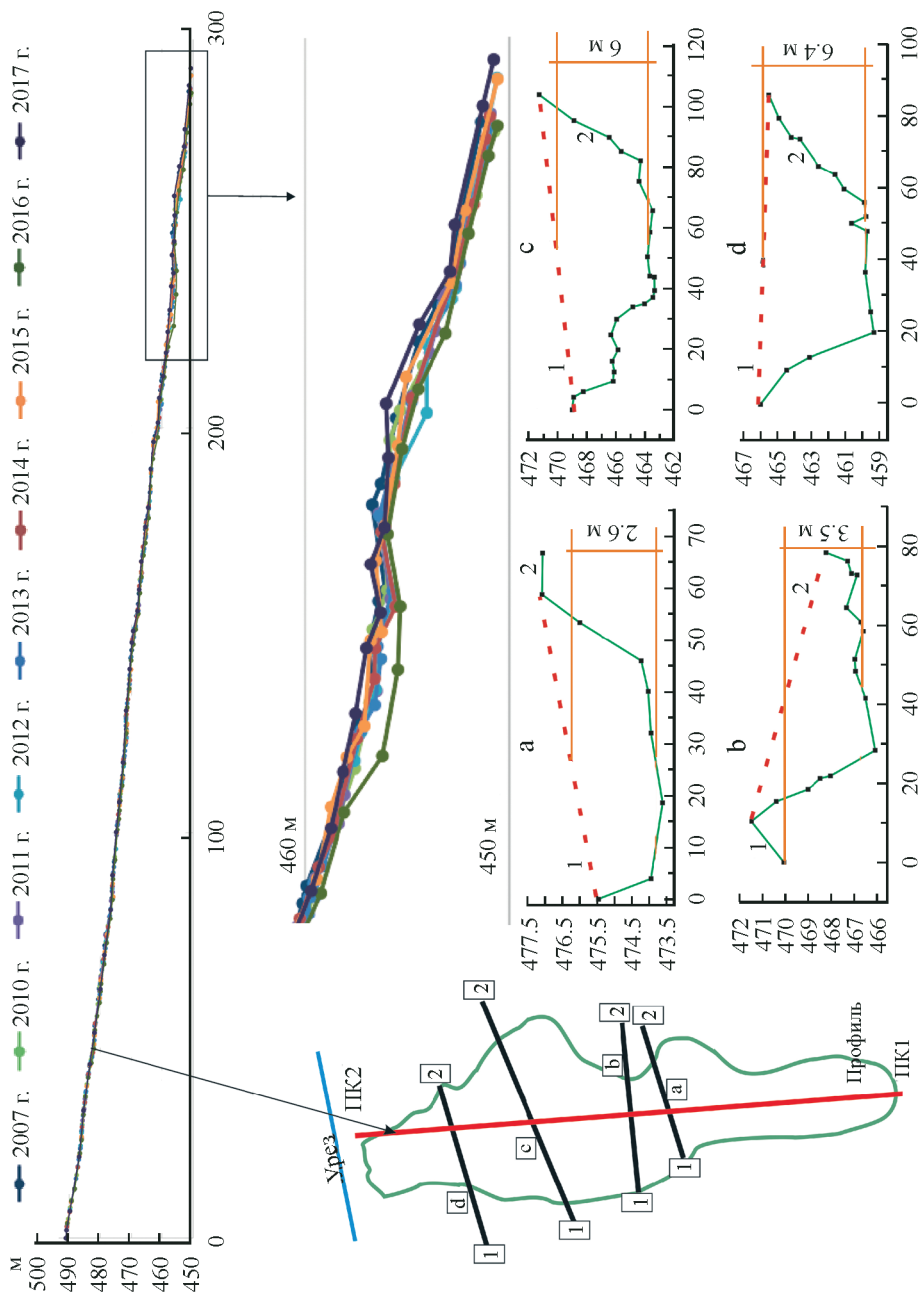


Рис. 3. Поперечные и продольные трансекты надводной части профиля.

a—d — поперечные трансекты на плане.

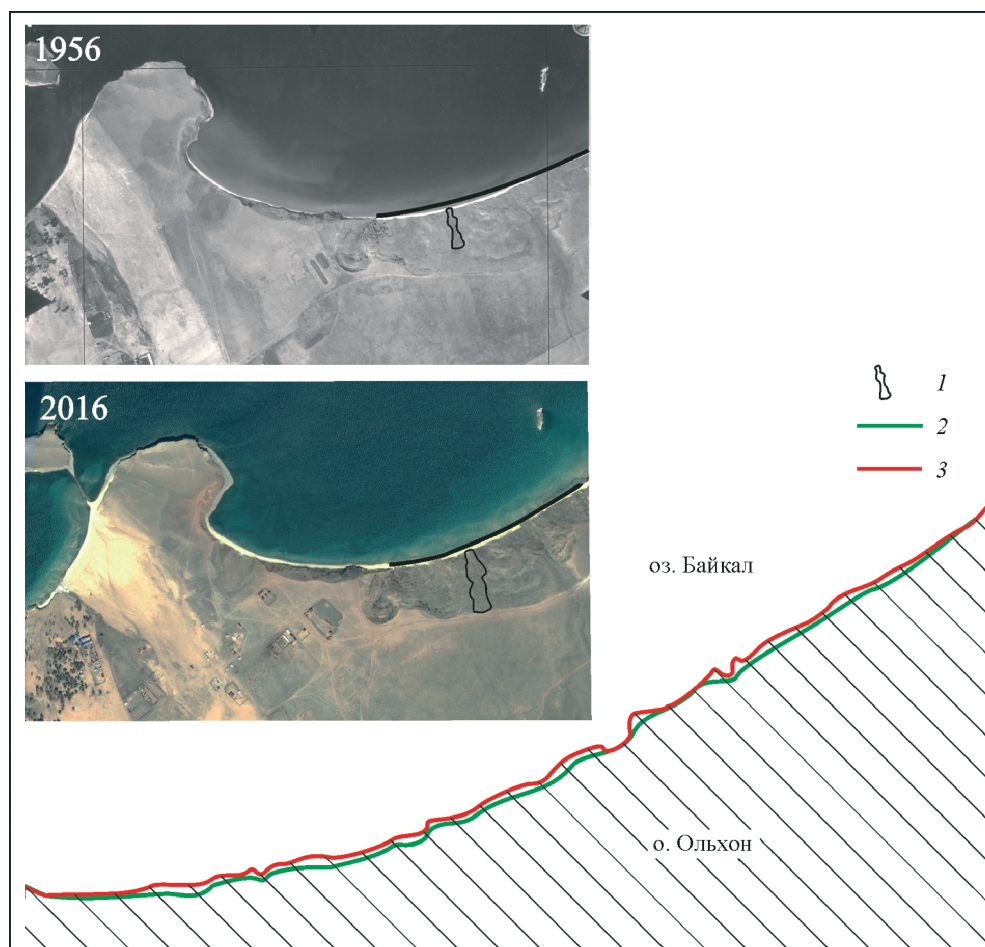


Рис. 4. Изменение абразионной бровки берега за 60 лет.

1 — контуры солифлюкционного языка, 2 — бровка берега в 1956 г., 3 — бровка берега в 2016 г.

чена только в его нижней части (рис. 3), а колебания уровня озера незначительно влияют на склон. Абразионный процесс на данном участке имеет небольшую активность. Размыву подвержен только материал, который сместился в зону пляжа, а это значит, что ведущим экзогенным процессом на данной территории являются оползни.

Применение дистанционных методов исследования. Динамика склоновых оползневых деформаций также хорошо отслеживается при интерпретации разновременных снимков. На фотографии участка, полученной при аэрофотосъемке 1950 г., можно выделить поверхность, разделяющую два оползневых цирка. На снимке 1953 г. при дешифрировании был выявлен сформировавшийся в пределах данной поверхности солифлюкционный поток площадью 0.0016 км². Полевые работы последних 10 лет и анализ современных космоснимков данного участка за период 2012—2016 гг. указывают на незатухающую активность солифлюкционного процесса. В настоящий момент площадь этой формы увеличилась до 0.013 км², что превышает показат

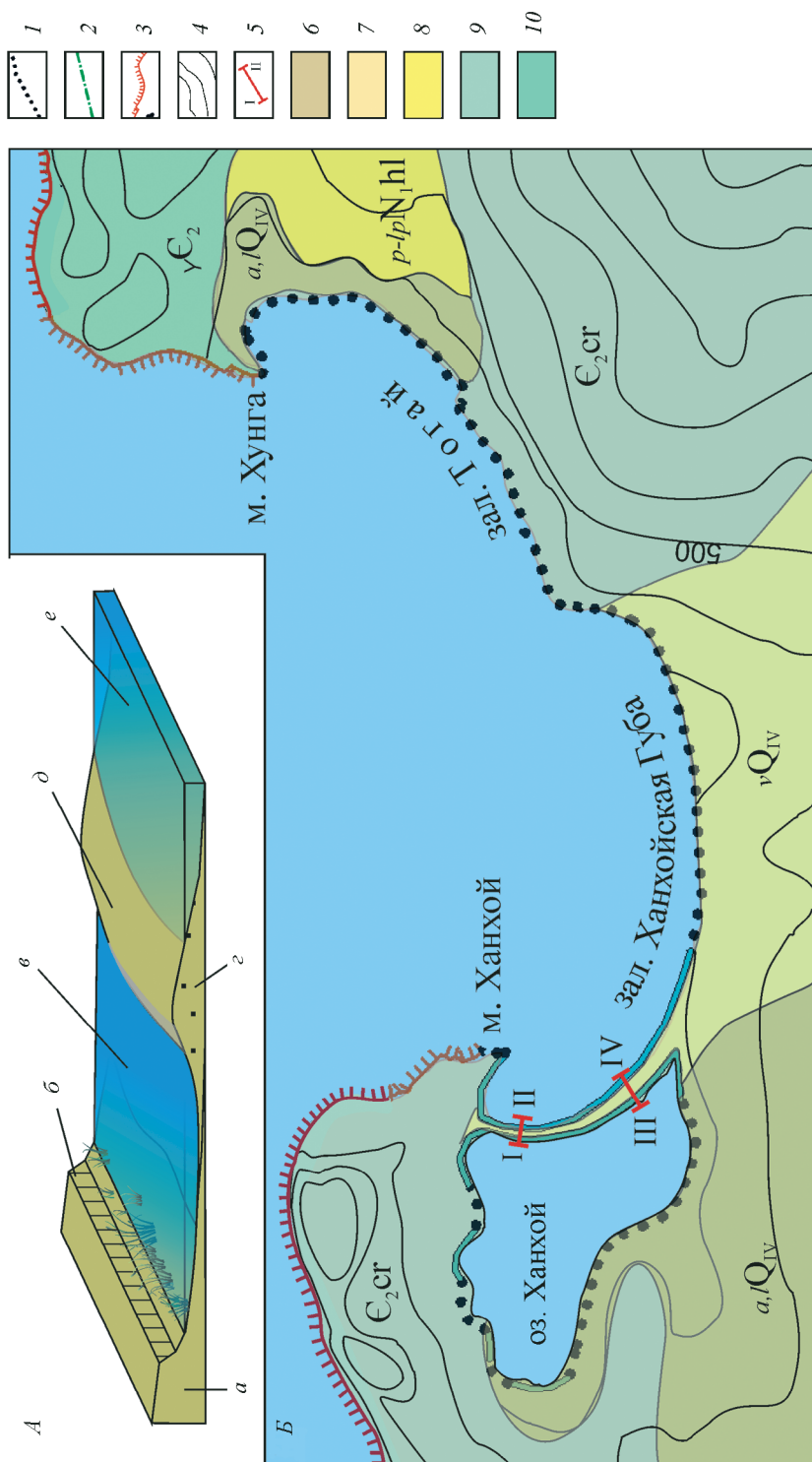


Рис. 5. Ключевой участок «Тогай».

A — принципиальная модель строения аккумулятивного берега: *a* — озерные и аллювиальные отложения (супеси, суглинки), *б* — абразионный уступ; *в* — лагунное озеро, *г* — песчаные отложения; *д* — аккумулятивная коса; *е* — озеро Байкал. *Б* — фрагмент карты районирования берегов заливов Тогай и Ханхойская Губа; типы берегов: 1 — абразионный, 2 — аккумулятивный, 3 — структурно-абразионный, 4 — профили надводной части аккумулятивной косы. Геологическое строение участка: 6 — четвертичные аллювиальные и озерные отложения (пески, суглинки, супесь), 7 — четвертичные эоловые отложения, 8 — неогеновые отложения (глины), 9 — метаморфические породы чернорудской свиты (парагнейсы, амфиболиты, прослои кристаллических известняков и кварцитов), 10 — магматические раннепалеозойские породы (граниты).

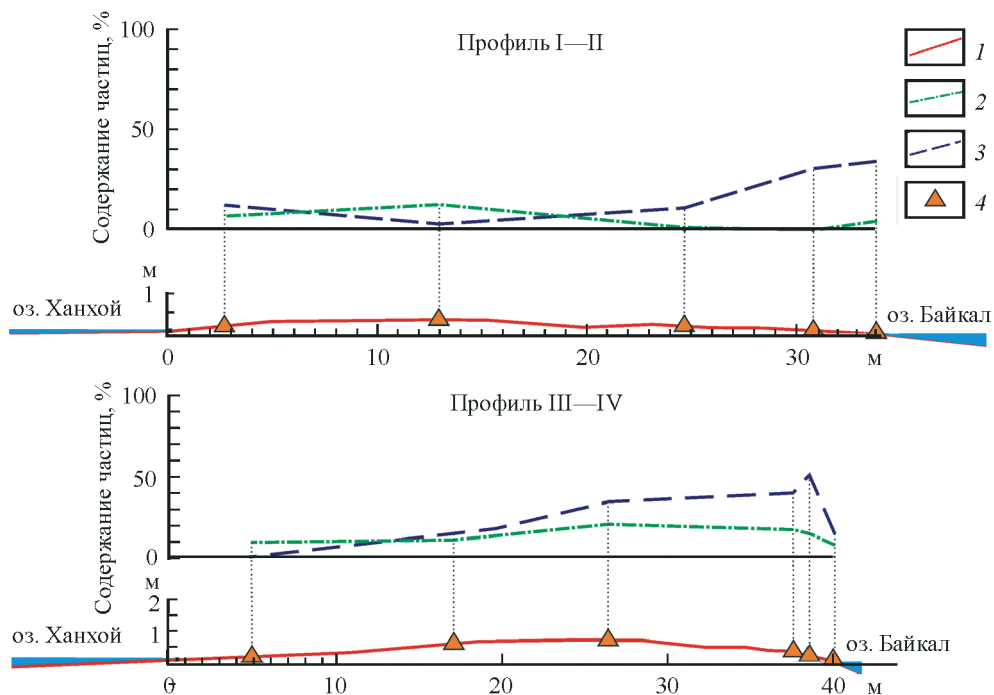


Рис. 6. Зависимость гранулометрического состава песчаных отложений косы от положения на поперечном морфологическом профиле (местоположение профилей см. на рис. 5). 1 — профиль надводной части косы, 2 — содержание частиц фракции 2.0—0.5 мм в %, 3 — содержание частиц фракции 0.25—0.1 мм, в %, 4 — место отбора образца.

тель 1953 г. (рис. 4). Объем сместившихся масс составляет 15 600 м³. Общая протяженность берега, пораженного солифлюкционными потоками и оползнями, составляет более 7 км, а их площадь равна 1.34 км² [9].

Ключевой участок «Тогай» представляет собой классически аккумулятивный тип берега. Участок находится в правой части одноименного залива и представлен аккумулятивной косой, сложенной песчаным материалом, отделяющей залив от озера Ханхой (рис. 5).

Применение прямых методов исследования. На этом участке ведутся ежегодные морфометрические измерения, а также поинтервальное опробование в пределах поперечных профилей (рис. 6). В результате обработки образцов песка, отобранного на косе, установлено, что в ее сложении преобладает терригенный материал (кварцевый песок с частицами слюдяных чешуек) размерностью 1—3 мм. В целом фракционный состав песка на косе постоянен вдоль всей пересыпи. В пляжевых отложениях содержание частиц размером более 2 мм составляет в среднем 32 %, максимальное содержание в 42.3 % отмечается в приустьевой части профиля. С удалением от залива к берегу содержание крупных фракций падает — в центральной части пляжа в среднем до 12.3 %. При проведении лабораторных определений гранулометрического состава было отмечено преобладание частиц размером от 0.25 до 0.1 мм. В основном это зерна прозрачного или матового кварца (рис. 6). В настоящее время основное поступление на пляж песка, пригодного для формирования золотого поля на острове, происходит с подводного склона в период

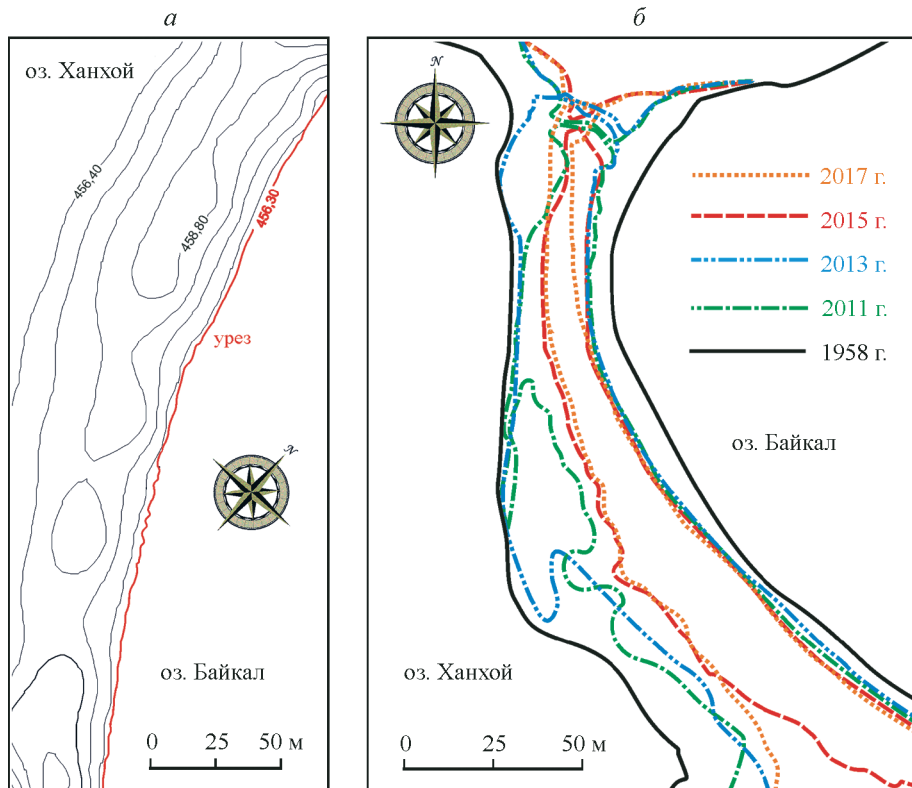


Рис. 7. Динамика пересыпи на ключевом участке «Тогай».

а — тахеометрическая съемка участка пересыпи, *б* — динамика изменения пересыпи во времени.

летних штормов. Осенью происходит смена северо-восточных ветров на северо-западные, что способствует разрушению сформированного вала и обеспечивает поступление материала на эоловое поле.

Применение дистанционных методов исследования. Анализ цифровой модели местности (2017 г.), а также аэрофото- (1958 г.) и космических (2009, 2010, 2013, 2014 и 2016 гг.) снимков с использованием ГИС-инструментов показал, что изменения берега происходят в основном в зоне примыкания косы к заливу Тогай. Отступление берега за 59 лет составило 9 м. Ежегодные наблюдения позволили установить, что формирующиеся подводные валы в летний период полностью разрушаются под воздействием осенних штормов, а материал переоткладывается в виде прибрежного вала высотой не более 1 м в зоне уреза. Далее после прекращения штормовых явлений вал теряет воду и под воздействием ветра слагающий его сухой материал сносится вдоль самой косы по направлению к острову, где развивается эоловое поле (рис. 7). Поверхность пляжа сложена крупным и мелкозернистым светло-желтым песком. Часть косы со стороны оз. Ханхой в настоящее время заболочена в пределах уреза, а надводная часть заросла травой. Подводные валы высотой от 3 до 5 м образуются при высоких уровнях Байкала и практически исчезают при низких, а их количество изменяется от 2 до 6 (рис. 8).

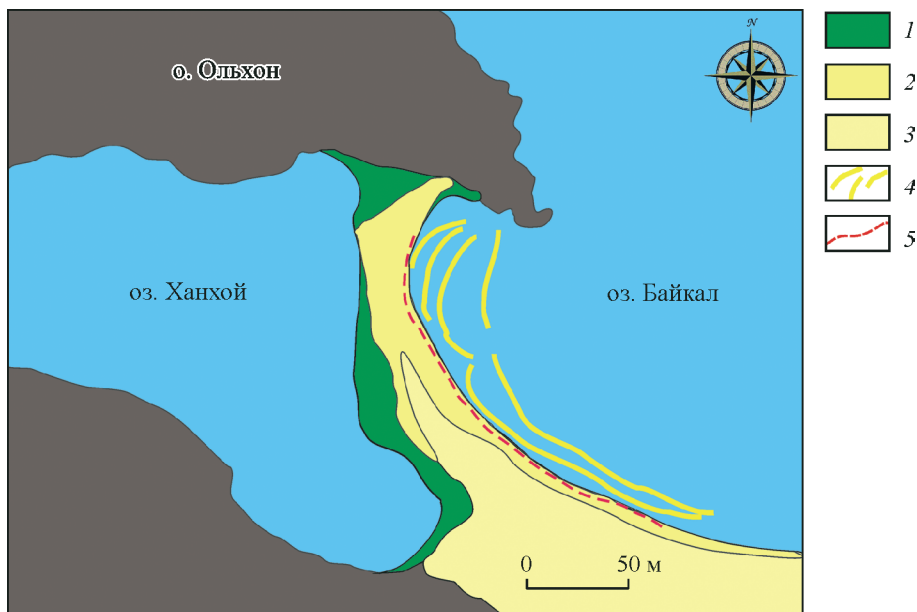


Рис. 8. Карта-схема распределения песка в пределах пересыпи.

1 — пески, заросшие травой, 2 — песок тела пересыпи, 3 — эоловый песок, 4 — подводные валы, 5 — надводный вал в зоне уреза.

ВЫВОДЫ

Экологически обоснованное использование береговой зоны должно быть основано на сборе данных и наблюдений за берегоформирующими процессами. В последние годы отмечено экспоненциальное увеличение количества исследований, основанных на сборе данных беспилотными летательными аппаратами. Однако применение прямых методов для изучения береговой зоны на локальном уровне остается актуальным.

Расчет разницы между данными, полученными в ходе обработки DEM-модели, тахеометрической съемки и дешифровки аэрофото- и космоснимков в разные временные отрезки, выявил переформирование берега в юго-западной части косы. В северо-западной части области исследования изменение объема отражает то, что поступающий песок переносится и переоткладывается в ее южной части в результате дефляционных процессов.

Полеты в прибрежных районах могут быть трудными из-за риска быстрого изменения метеорологических условий. Несмотря на эти ограничения, данное исследование показывает, что дистанционно пилотируемые авиационные системы в сочетании с прямыми морфометрическими методами могут быть успешно использованы в процессе изучения береговой зоны.

Формирование подобных типов берегов, которые представлены в заливах Тогай и Харалдайский, происходит в результате влияния комплекса природных компонентов, усиливающих или ослабляющих действие друг друга. Характер распределения гранулометрического состава отложений в пределах аккумулятивных берегов является своеобразным индикатором современной активности некоторых процессов. Динамика абразионных берегов о-ва Оль-

хон зависит в первую очередь от процессов, осложняющих склон при значительном колебании уровня оз. Байкал.

Лабораторные исследования отобранных образцов выполнены на базе Центра коллективного пользования (ЦКП) «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН, г. Иркутск.

Работа выполнена при поддержке интеграционной программы «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей» (2017—2020 гг.) в рамках проекта № 3.2.

Список литературы

- [1] Беркович К. М., Зайцев А. А., Новаковский Б. А., Свентэк Ю. В. Использование дистанционного зондирования при морфометрическом анализе русла и поймы // Геоморфология. 1986. № 4 С. 51—57.
- [2] Берлянт А. М. Картографический метод исследования. М.: Изд-во МГУ, 1988. 215 с.
- [3] Бондарик Г. К., Ярг Л. А. Природно-технические системы и их мониторинг // Инженерная геология. 1990. № 5. С. 3—9.
- [4] Галазий Г. И., Пармузин Ю. П. Динамика Байкальской впадины. Новосибирск: Наука, 1975. 286 с.
- [5] Зенкович В. П. Кадастр и мониторинг береговой зоны морей СССР // Геоэкология Мирового океана. Л.: ГО СССР, 1990. С. 120—122.
- [6] Иванов И. П., Тржцинский Ю. Б. Инженерная геодинамика. СПб.: Наука, 2001. 416 с.
- [7] Инженерная геология. Инженерная геодинамика / Под ред. В. Д. Ломтадзе. Л.: Недра, 1977. 479 с.
- [8] Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 263 с.
- [9] Козырева Е. А., Рыбченко А. А., Щитек Т., Пеллинен В. А. Солифлюкционные оползни побережья острова Ольхон // Вестн. ИрГТУ. 2011. Т. 51, № 4. С. 41—49.
- [10] Ласточкин А. Н. Методы морского геоморфологического картографирования. Л.: Недра, 1982. 272 с.
- [11] Пинегин А. В. Основные закономерности формирования и динамика береговой зоны оз. Байкал: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1975. 27 с.
- [12] Ступин В. П., Пластинин Л. А. Морфодинамическое картографирование типов берегов ангарских водохранилищ по материалам дистанционного зондирования Земли // Вестн. ИрГТУ. 2011. Т. 56, № 9. С. 72—74.
- [13] Трифонова Т. А., Мищенко Н. В., Краснощеков А. Н. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях. М.: Академический проект, 2005. 350 с.
- [14] Хабидов А. Ш., Кусковский В. С., Жиндарев Л. А., Хейнс Д. М. Берега морей и внутренних водоемов. Актуальные проблемы геологии, геоморфологии и динамики. Новосибирск: СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. 272 с.
- [15] Швецов П. Ф. Режимные инженерно-геологические и гидрогеологические наблюдения в городах. М.: Наука, 1983. 160 с.
- [16] Bird E. The modern prevalence of beach erosion // Marine Pollution Bulletin. 1987. Vol. 18. P. 151—157.

- [17] *Blodget H. W., Taylor P. T., Roark J. H.* Shoreline changes along the Rosetta-Nile Promontory: monitoring with satellite observations // *Marine Geology*. 1991. Vol. 99. P. 67—77.
- [18] *Costal evolution: late quaternary shoreline morphodynamics / R. W. G. Carter, C. D. Woodroffe*, London: Cambridge University Press, 1997. 540 p.
- [19] *Hapke C., Richmond B.* Monitoring beach morphology changes using small-format aerial photography and digital softcopy photogrammetry // *Environmental Geosciences*. 2000. Vol. 7. P. 32—37.
- [20] *Harley M. D., Turner I. L., Short A. D., Ranasinghe R.* Assessment and integration of conventional, RTK-GPS and image-derived beach survey methods for daily to decadal coastal monitoring // *Coastal Engineering*. 2010. Vol. 58. P. 194—205.
- [21] *Kroon A., Davidson M. A., Aarninkhof S. G. J., Archetti R., Armaroli C., Gonzalez M., Medri S., Osorio A., Aagaard T., Holman R. A., Spanhoff R.* Application of remote sensing video systems to coastline management problems // *Coastal Engineering*. 2007. Vol. 54. P. 493—505.
- [22] *Lee J. M., Park J. Y., Choi J. Y.* Evaluation of sub-aerial topographic surveying techniques using total station and RTK-GPS for applications in macrotidal sand beach environment // *Journal of Coastal Research*. 2013. Vol. 65. P. 535—540.
- [23] *Masselink G., Hughes M., Knight J.* Introduction to coastal processes and geomorphology. London: Routledge, 2014. 432 p.
- [24] *Morton R. A., Leach M. P., Paine J. G., Cardoza M. A.* Monitoring beach changes using GPS surveying techniques // *Journal of Coastal Research*. 1993. Vol. 9. P. 702—720.
- [25] *Saye S. E., Van der Wal D., Pye K., Blott S. J.* Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data // *Geomorphology*. 2005. Vol. 72. P. 128—155.
- [26] *Scharstein D., Szeliski R. A.* Taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms // *International Journal of Computer Vision*. 2002. Vol. 47. P. 7—42.
- [27] *Seitz S., Curless B., Diebel J., Scharstein D., Szeliski R. A.* Comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms // *Vision and Pattern Recognition: computer Society Conf Computer*, In: *Proc CVPR '06 I. E.* Washington, DC.: IEEE Computer Society. 2006. Vol. 1. P. 519—526.
- [28] *Stockdon H. F., Sallenger A. H., List J. H., Holman R. A.* Estimation of shoreline position and change using airborne topographic lidar data // *Journal of Coastal Research*. Vol. 18. P. 502—513.
- [29] *Ullman S.* The interpretation of structure from motion // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 1979. Vol. 203. P. 405—426.
- [30] *Verhoeven G.* Taking computer vision aloft-archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan // *Archaeological Prospection*. 2011. Vol. 18. P. 67—73.
- [31] *Wulder M. A., Hall R. J., Coops N. C., Franklin S. E.* High spatial resolution remotely sensed data for ecosystem characterization // *Bioscience*. 2004. Vol. 54. P. 511—521.
- [32] *Young A., Ashford S.* Application of airborne lidar for seacliff volumetric change and beach-sediment budget contributions // *Journal of Coastal Research*. 2006. Vol. 22. P. 307—318.

Поступила в редакцию 15.05.2018 г.

После доработки 23.08.2018 г.

Принята к публикации 18.09.2018 г.

Application of direct and remote methods for the study of abrasion-accumulative shores of Olkhon Island, Lake Baikal

© V. A. Pellinen

Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk
E-mail: vadim.a.pellinen@ya.ru

The application of direct (tacheometric survey) and remote (cosmic and aerial survey) methods of the studying abrasion-accumulative shores was considered. Morphometric measurements were performed at key sites using the tacheometric survey. The influence of the level regime of Lake Baikal and the accompanying exogenous relief-shaping processes on the dynamics of the coastal zone was noted. The interpretation of images obtained using uncrewed aerial vehicles (UAV), aerial and cosmic survey, allowed to establish morphometric changes in the shoreline. Conclusions were drawn on the application of this UAV for the investigation of the coasts.

Key words: abrasion, accumulation, coast, UAV, Olkhon Island, Lake Baikal.

References

- [1] *Berkovich K. M., Zaytsev A. A., Novakovskiy B. A., Sventek Yu. V.* Ispol'zovaniye distantsionnogo zondirovaniya pri morfometricheskom analize rusla i poymy // *Geomorfologiya*. 1986. N 4 S. 51—57.
- [2] *Berlyant A. M.* Kartograficheskiy metod issledovaniya. M.: Izd-vo MGU, 1988. s.
- [3] *Bondarik G. K., Yarg L. A.* Prirodno-tekhnicheskiye sistemy i ikh monitoring // *Inzhenernaya geologiya*. 1990. N 5. S. 3—9.
- [4] *Galaziy G. I., Parmuzin Yu. P.* Dinamika Baykal'skoy vpadiny. Novosibirsk: Nauka, 1975. 286 s.
- [5] *Zenkovich V. P.* Kadastr i monitoring beregovoy zony morey SSSR // *Geoekologiya Mirovogo okeana*. L.: GO SSSR, 1990. S. 120—122.
- [6] *Ivanov I. P., Trzhtsin'skiy Yu. B.* Inzhenernaya geodinamika. SPb.: Nauka, 2001. 416 s.
- [7] *Inzhenernaya geologiya. Inzhenernaya geodinamika* / Pod. red. V. D. Lomtadze. L.: Nedra, 1977. 479 s.
- [8] *Kashkin V. B., Sukhinin A. I.* Distsionnoye zondirovaniye Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. M.: Logos, 2001. 263 s.
- [9] *Kozyreva Ye. A., Rybchenko A. A., Shchipek T., Pellinen V. A.* Soliflyuktsionnyye opolzni poberezh'ya ostrova Ol'khon // *Vestn. IrGTU*. 2011. T. 51, N 4. S. 41—49.
- [10] *Lastochkin A. N.* Metody morskogo geomorfologicheskogo kartografirovaniya. L.: Nedra, 1982. 272 s.
- [11] *Pinegin A. V.* Osnovnyye zakonomernosti formirovaniya i dinamika beregovoy zony oz. Baykal: Avtoref. ... dis. kan. geol.-min. nauk. Irkutsk: IZK SO AN SSSR, 1975. 27 s.
- [12] *Stupin V. P., Plastinin L. A.* Morfodinamicheskoye kartografirovaniye tipov beregov angarskikh vodokhranilishch po materialam distantsionnogo zondirovaniya Zemli // *Vestn. IrGTU*. 2011. T. 56, N 9. S. 72—74.
- [13] *Trifonova T. A., Mishchenko N. V., Krasnoshchekov A. N.* Geoinformatsionnyye sistemy i distantsionnoye zondirovaniye v ekologicheskikh issledovaniyakh. M.: Akademicheskii proyekt, 2005. 350 s.
- [14] *Khabidov A. Sh., Kuskovskiy V. S., Zhindarev L. A., Kheyns D. M.* Berega morey i vnutrennikh vodoyemov. Aktual'nyye problemy geologii, geomorfologii i dinamiki. Novosibirsk: SO RAN, NITS OIGGM, 1999. 272 s.
- [15] *Shvetsov P. F.* Rezhimnyye inzhenerno-geologicheskkiye i gidrogeologicheskkiye nablyudeniya v gorodakh. M.: Nauka, 1983. 160 s.

- [16] *Bird E.* The modern prevalence of beach erosion // *Marine Pollution Bulletin*. 1987. Vol. 18. P. 151—157.
- [17] *Blodget H. W., Taylor P. T., Roark J. H.* Shoreline changes along the Rosetta-Nile Promontory: monitoring with satellite observations // *Marine Geology*. 1991. Vol. 99. P. 67—77.
- [18] *Costal evolution: late quaternary shoreline morphodynamics / R. W. G. Carter, C. D. Woodroffe*, London: Cambridge University Press, 1997. 540 p.
- [19] *Hapke C., Richmond B.* Monitoring beach morphology changes using small-format aerial photography and digital softcopy photogrammetry // *Environmental Geosciences*. 2000. Vol. 7. P. 32—37.
- [20] *Harley M. D., Turner I. L., Short A. D., Ranasinghe R.* Assessment and integration of conventional, RTK-GPS and image-derived beach survey methods for daily to decadal coastal monitoring // *Coastal Engineering*. 2010. Vol. 58. P. 194—205.
- [21] *Kroon A., Davidson M. A., Aarninkhof S. G. J., Archetti R., Armaroli C., Gonzalez M., Medri S., Osorio A., Aagaard T., Holman R. A., Spanhoff R.* Application of remote sensing video systems to coastline management problems // *Coastal Engineering*. 2007. Vol. 54. P. 493—505.
- [22] *Lee J. M., Park J. Y., Choi J. Y.* Evaluation of sub-aerial topographic surveying techniques using total station and RTK-GPS for applications in macrotidal sand beach environment // *Journal of Coastal Research*. 2013. Vol. 65. P. 535—540.
- [23] *Masselink G., Hughes M., Knight J.* Introduction to coastal processes and geomorphology. London: Routledge, 2014. 432 p.
- [24] *Morton R. A., Leach M. P., Paine J. G., Cardoza M. A.* Monitoring beach changes using GPS surveying techniques // *Journal of Coastal Research*. 1993. Vol. 9. P. 702—720.
- [25] *Saye S. E., Van der Wal D., Pye K., Blott S. J.* Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: an investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data // *Geomorphology*. 2005. Vol. 72. P. 128—155.
- [26] *Scharstein D., Szeliski R. A.* Taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms // *International Journal of Computer Vision*. 2002. Vol. 47. P. 7—42.
- [27] *Seitz S., Curless B., Diebel J., Scharstein D., Szeliski R. A.* Comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms // *Vision and Pattern Recognition: computer Society Conf Computer*, In: *Proc CVPR '06 I. E.* Washington, DC.: IEEE Computer Society. 2006. Vol. 1. P. 519—526.
- [28] *Stockdon H. F., Sallenger A. H., List J. H., Holman R. A.* Estimation of shoreline position and change using airborne topographic lidar data // *Journal of Coastal Research*. Vol. 18. P. 502—513.
- [29] *Ullman S.* The interpretation of structure from motion // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 1979. Vol. 203. P. 405—426.
- [30] *Verhoeven G.* Taking computer vision aloft-archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan // *Archaeological Prospection*. 2011. Vol. 18. P. 67—73.
- [31] *Wulder M. A., Hall R. J., Coops N. C., Franklin S. E.* High spatial resolution remotely sensed data for ecosystem characterization // *Bioscience*. 2004. Vol. 54. P. 511—521.
- [32] *Young A., Ashford S.* Application of airborne lidar for seacliff volumetric change and beach-sediment budget contributions // *Journal of Coastal Research*. 2006. Vol. 22. P. 307—318.