ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ЛИТОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (НА ПРИМЕРЕ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ОХОТСКОГО МОРЯ)

С. Г. Миронюк¹, А. А. Ермолов²

¹Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М. В. Ломоносова

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет

mironyuksg@gmail.com; alexandr.ermolov@gmail.com

Аннотация: рассмотрены, с привлечением материалов дистанционного зондирования Земли, особенности разрушения берегов на двух участках Охотского моря, существенно отличающихся по природным условиям. Анализ разновременных космических снимков высокого разрешения показал, что в условиях открытого моря (Набиль-Луньский участок) существенным фактором, влияющим на динамику берегов, является миграция мегафестонов и штормовые деформации. В проливе Невельского стабильности западного берега способствуют широкие осушки (ватты) и марши. Восточный берег (о. Сахалин) в районе мыса Уанги приглубый (уклон больше 0,03), что благоприятствует переработки берегов. В границах изученных участков оценена среднемноголетняя скорость абразии.

Ключевые слова: Охотское море, пролив Невельского, береговая зона, литодинамика, абразия, мегафестоны, клиф, космические снимки

Морские берега являются одним из наиболее уязвимых природных объектов с точки зрения интенсивности развития экзогенных геологических процессов [1]. Строительство инженерных сооружений (портов, заводов по производству сжиженного природного газа (СПГ), ветрогенераторов, морских трубопроводов и др.) в береговой зоне сопряжено с повышенным геологическим риском.

В частности, при строительстве морских трубопроводов одними из наиболее опасных считаются участки их выхода на берег (береговые примыкания), где происходит резкая смена инженерно-геологической обстановки и условий строительства и эксплуатации [2]. Согласно нормам проектирования и строительства морского трубопровода, он должен заглубляться в дно на участках его выхода на берег. При этом проектная отметка верха, заглубленного в грунт трубопровода (по утяжеляющему покрытию), должна назначаться ниже прогнозируемой глубины размыва дна на весь период эксплуатации морского трубопровода.

Абразионные процессы и связанные с ними деформации дна, размыв насыпей и грунтов обратной засыпки трубопроводов, грунтовых оснований трубопроводов, расположенных на дне, могут привести к оголению и провисанию трубопроводов и, как следствие, вызвать их деформации, в том числе в результате повреждения ледяными образованиями, траловыми досками, якорями и т. д. [3;4].

С целью выявления опасных природных процессов и прогноза динамики берегов выполняется комплекс литодинамических исследований. Мето-

дика полевых работ, применяемое оборудование и технологии исследований разрабатываются для каждого конкретного случая отдельно с учетом требований нормативных документов. Некоторые аспекты проводимых исследований рассмотрены в литературе [5].

В последние годы неотъемлемой частью литодинамических исследований стали дешифрирование и сравнительный анализ материалов дистанционного зондирования. Уже на предпроектных этапах изысканий используются различные спутниковые данные. Дешифрирование космоснимков (КС) позволяет сократить затраты средств и времени на выбор наиболее благоприятного в инженерно-геологическом отношении участка выхода трубопровода на берег. В частности, анализ крупномасштабных КС Google позволил определить типы берегов полуострова Абрау (абразионные, аккумулятивные и техногенно измененные), выявить проявления процессов абразии, аккумуляции отложений, а также дешифрировать пролювиальные конусы выноса и оползни [6]. С успехом используются дистанционные материалы и при изучении береговой зоны арктических и субарктических морей [7; 8; 9].

Инженерно-гидрометеорологические изыскания с использованием КС и аэрофотоснимков (АФС) в 2009–2010 гг. и 2014–2015 гг. выполнялись на двух участках береговой зоны Охотского моря: Набиль-Лунском и Невельском.

В настоящей работе рассматриваются отдельные результаты литодинамических исследований на ключевых участках Охотского моря, основной задачей

которых являлся прогноз динамики берегов и дна на период строительства и эксплуатации проектируемых сооружений.

Набиль-Луньский участок. Участок расположен на морском берегу в северо-восточной части о. Сахалин между заливами Луньский и Набиль. Согласно существующей схеме морфолитодинамического районирования участок исследований относится к Луньско-Старо-Набильской зоне. Берег в рассматриваемом районе представлен чередованием участков с преимущественным развитием абразионных и аккумулятивных процессов. Выделяются абразионные участки с клифом и прислоненным пляжем, а также аккумулятивные участки с отмершим клифом, пляжем полного профиля, сложенным разнозернистыми песками с прослоями мелкого гравия. Максимальная ширина пляжа на участке работ в 2010 г. составляла 110 м. Минимальная ширина пляжа зафиксирована в пределах абразионного участка и составляла около 15 м.

В тыльной части пляжей встречаются фрагменты сохранившихся штормовых валов высотой до 2–3 м. Выше по профилю к пляжу примыкает терраса голоценового возраста, осложненная серией береговых валов и прослеживающейся вдоль всей береговой линии авантюной высотой до 6–8 м. С мористой стороны к авантуне в ряде мест примыкает низкая, местами активно размываемая современная терраса высотой до 4–5 м, ширина ее может достигать 40–50 м.

Высота ежегодно повторяющихся штормовых волн в мелководной зоне (до глубин 5–7 м) варьирует от 0,9 до 5,7 м. Среднегоголетняя максимальная продолжительность шторма – 8,7 суток. Высота прилива 2,2 м. Максимальные скорости реверсивных приливно-отливных течений в прибрежной зоне достигают 97 см/с, а скорость дрейфовых течений – 50–70 см/с.

Район является одним из наиболее активных в морфолитодинамическом отношении на побережье о-ва Сахалин. Наблюдается размыв берегов, что по мнению ряда авторов [8; 10] связано с неравномерным распределением пляжевого материала вдоль берега в результате формирования системы мегафестонов. Морфологически они представляют собой крупные аккумулятивные волнообразные тела с периодом вдоль берега порядка 350–500 м и амплитудой вдоль нормали к берегу 50–80 м. В отношении движения мегафестонов известно, что они медленно смещаются в направлении вдольберегового потока наносов.

На вогнутых участках береговых фестонов, где ширина пляжа уменьшается, авантюна и терраса подвергаются периодическим размывам. Высота

уступа размыва составляет 1,5–3,5 м. Происхождение фестонов, их морфология и динамика изучены в недостаточной степени [11; 12].

Для получения сведений о долговременных тенденциях развития побережья района работ были произведены совмещение и анализ разновременных КС и АФС. Исходными данными для дешифрирования послужили цветные КС высокого разрешения (размер пикселя – 1 x 1 м), сделанные спутниками Ikonos в 2007 г. и Pleiades в 2014 и 2015 гг., а также черно-белое изображение, полученное с камеры КФА-1000 в 1983 г. Данные, полученные со снимка Ikonos и Pleiades, были переданы в виде ортотрансформированного изображения (внесены поправки за рельеф), с географической привязкой. Данные с камеры КФА-1000 были переданы как растровое изображение без географической привязки и были преобразованы путем привязки к топографической карте масштаба 1:100 000 в системе координат WGS 84. Кроме того, анализировался КС полученный со спутника GeoEye и АФС с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) сверхвысокого разрешения, позволившие оценить динамику береговой зоны за более короткий период времени (рис. 1).

Установлено, что средняя скорость абразии берегового уступа по результатам дешифрирования разновременных (1983–2010 гг.) КС и АФС составила от 0,0 до 0,44 м/год. При этом на изученном участке берега протяженностью 7 км отмечается чередование участков размыва с относительно стабильными участками (размыв отсутствует или имеет минимальные значения). Ширина пляжа на стабильных участках наибольшая и достигает 80–110 м. На участках размыва ширина пляжа существенно меньше – 15–60 м. Следует заметить, что отрезкам берега с широким пляжем соответствуют выступы («мысы») мегафестонов и преимущественно стабильное положение береговой линии, а сегментам берега, где ширина пляжа уменьшается, отвечают внутренние размываемые части фестонов.

Пролив Невельского. Участок включает два подучастка: мыс Уанги (о. Сахалин) и мыс Каменный (материковая часть), разделенные проливом Невельского (рис. 2).

Согласно геоморфологической схеме побережья в районе м. Уанги развиты следующие типы берегов: абразионные, с уступом в рыхлых осадочных породах; абразионные с отмершими клифами и примкнувшей аккумулятивной террасой (пляжем); аккумулятивные пляжевые. Ширина пляжей изменяется от 24 до 112 м. На участке берегового примыкания уклоны пляжей составляют от 0,03 до 0,09 (на приглубых участках). Средняя высота бровки береговой террасы составляет 4,4 м. Вскрытый бурением сква-

жин геологический разрез представлен в основном песками пылеватыми, мелкими и средней крупности. В ходе рекогносцировочного обследования района работ, а также в результате детальных исследований береговой зоны установлены признаки современного разрушения береговых уступов и размыва

причального сооружения, образование штормовых деформаций и уступов размыва на пляже. Течения в проливе ориентированы в направлении с северо-востока на юго-запад. В районе мыса Уанги течения носят реверсивный характер, средняя скорость 15,0 см/сек.

Рис. 1. Снимок береговой зоны, полученный с БПЛА (Охотское море)

Рис. 2. Схема размещения изученных подучастков
1-мыс Каменный; 2- мыс Уанги

Береговая зона на участке исследований в районе мыса Каменный неоднородна. Выделены следующие типы берегов: абразионно-денудационные в прочных скальных породах; абразионные с отмер-

шими клифами и примкнувшей аккумулятивной террасой; аккумулятивные (ваттовые и пляжевые), наиболее характерные для исследованного района. По данным буровых работ аккумулятивные берега

сложены комплексом позднеплейстоцен-голоценовых прибрежно-морских отложений, представленных песками пылеватыми, глинами и суглинками. Коренными породами являются слабовыветрелые диориты, залегающие на глубинах от 0,5 до 8,0 м от поверхности.

Небольшая площадь акватории и малые глубины не способствуют развитию в проливе значительного волнения. Преобладающим является волнение силой 2–3 балла. Высота волн в основном не превышает 2 м, однако в отдельных случаях она может достигать 3–4 м. Средняя скорость течений основных румбов составляет на мелководье мыса Каменный 11 см/сек.

Для определения количественных показателей скорости переработки берегов пролива Невельского в районе мыса Унанги были проанализированы КС сверхвысокого разрешения Ikonos 2001 года

и QuickBird 2006 года, состоящие из многозонального и панхроматического изображений, и космические снимки 1962–1974 гг. Corona/Argon высокого разрешения. Дешифрирование КС 1968–2001 гг. показало, что среднемноголетняя скорость абразии непосредственно в коридоре изысканий шириной 1 км составляла 0,3–0,6 м/год, а за его пределами (к северу от проектируемого участка), на одном из сегментов берега, около 2,1 м/год. Одновременно с клифом разрушаются и расположенные на террасе дюны [13].

По результатам дешифрирования КС района м. Каменного установлено, что аккумулятивные берега с 1968 по 2006 гг. находились в относительно стабильном состоянии, а абразионно-денудационный берег на мористой оконечности мыса подвергался абразии со скоростями 0,05–0,1 м/год.

Список литературы

1. Дунаев Н.Н., Игнатов Е.И., Буров В.П. Изучение морской береговой зоны – актуальное направление в исследовании Российской Арктики // Российский журнал прикладной экологии. 2010. № 5. С. 50–59.
2. Дарбинян Д.С., Кантаржи И.Г., Леонтьев И.О. Сопряжение с берегом современных морских трубопроводов // Литодинамика донной контактной зоны океана. Материалы Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора В. В. Лонгинова. М.: ГЕОС, 2009. С. 77–79.
3. Миронюк С.Г. Береговые примыкания морских газопроводов: выбор технологии строительства с учетом оценки геологических опасностей // Газотранспортные системы: настоящее и будущее: тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции GTS-2015 (28–29 октября 2015 г.). М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2015. С. 31.
4. Миронюк С.Г., Скворцов С.В. Литодинамика берега и северо-восточной части присахалинского шельфа (Охотское море, Кириная площадь) // Обеспечение гидрометеорологической и экологической безопасности морской деятельности. Издатель: Сорокин Роман Васильевич. Астрахань, 2015. С. 129–130.
5. Ермолов А.А. Морфолитодинамические исследования в составе инженерных изысканий для строительства // Инженерные изыскания. 2014. № 9–10. С. 86–89.
6. Миронюк С.Г., Касимова О.М. Применение данных дистанционного зондирования для оценочного районирования участков береговых примыканий трубопроводов // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и промышленных вызовов («Опасные явления»): материалы Международной научной конференции (г. Ростов-на-Дону, 13–23 июня 2019 г.). Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019. С. 183–185.
7. Кузнецов Д.Е., Носков А.И., Огородов С.А. Использование материалов разновременных аэрокосмических съемок в целях исследования динамики арктических берегов // Морские берега – эволюция, экология, экономика: Материалы XXIV Международной береговой конференции, посвященной 60-летию со дня основания Рабочей группы «Морские берега» (Туапсе, 1–6 октября 2012 г.): в 2 т. Краснодар: Издательский Дом – Юг. Т. 1. 2012. С. 228–231.
8. Афанасьев В.В., Уба А.В. Размыв морских берегов северо-восточного Сахалина // Геоморфология. 2018. № 4. С. 25–35.
9. Цыганкова А.Е. Методы анализа спутниковых изображений при изучении динамики берегов северо-восточной части Белого моря // Литодинамика донной контактной зоны океана. Материалы Международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора В. В. Лонгинова. М.: ГЕОС. С. 161–163.
10. Белошапков А.В., Гордин А.И., Ильин В.В., Путов В.Ф. Аккумулятивные формы прибрежной зоны и шельфа северо-восточного Сахалина // Человечество и береговая зона Мирового океана в XXI веке. М.: ГЕОС, 2001. С. 126–140.
11. Бадюкова Е.Н., Жиндарев Л.А., Лукьянова С.А., Соловьева Г.Д. Фестоны на берегах Куршской и Вислинской кос (юго-восточная Балтика) // Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озер и водохранилищ. Изд-во Иркутского университета. Иркутск, 2013. С. 21–28.
12. Афанасьев В.В. Морфолитодинамические процессы и развитие берегов контактной зоны субарктических и умеренных морей Северной Пацифики. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2020. 234 с.
13. Афанасьев В.В., Игнатов Е.И., Чистов С.В. Морфология и динамика берегов и дна пролива Невельского района проектирования постоянного железнодорожного перехода. Смоленск: Маджента, 2008. 128 с.

USE OF EARTH REMOTE SENSING MATERIALS IN LITHODYNAMIC RESEARCH (ON THE EXAMPLE OF THE COASTAL ZONE OF THE OKHOTSK SEA)

S. Mironyuk¹, A. Ermolov²

¹Moscow State University, Seismic Data Analysis Centre

²Moscow State University, Faculty of Geography

mironyuksg@gmail.com; alexandr.ermolov@gmail.com

Abstract. The features of coastal destruction on two key areas of the Sea of Okhotsk: Nabil-Lunsky and Nevelsky, are examined, using materials from remote sensing of the Earth. Section significantly different in natural conditions. The analysis of high-resolution satellite images of different times showed that in the Okhotsk sea (Nabil-Lunsky site) a significant factor affecting the dynamics of the coasts is the migration of cusped bars and storm deformations. Morphologically, cusped bars are large accumulative wave-like bodies with a period along the coast of about 350–500 m and an amplitude along the normal to the coast of 50–80 m. Cusped bars are known to slowly migrate in the direction of the coastal sediment flow. It was found that the average abrasion rate of the beach scarp according to the results of decoding different-time (1983–2010) satellite images and aerial photographs within the Nabil-Lunsky site was from 0.0 to 0.44 m/year. In the Nevel Strait, stability of the west coast is facilitated by wide wadis and marches. The eastern coast (Sakhalin Island) in the area of Cape Ouangi is steep coast (slope is greater than 0.03), which favors the marginal erosion. Within the boundaries of the studied areas, the mean annual rate of abrasion was estimated. According to the results of deciphering the satellite images of the Cape Kamennyi area, it was found that the accumulative coasts from 1968 to 2006 were in relatively stable condition, and the abrasion-denudation shore at the seabed end of the cape was subjected to abrasion at speeds of 0.05–0.1 m/year.

Keywords: Sea of Okhotsk, Nevelskoy Strait, coastal zone, lithodynamics, abrasion, cusped bars, cliff, satellite imagery, remote sensing and image interpretation

References

1. Dunaev N.N., Ignatov E.I., Burov V.P. Izuchenie morskoy beregovoy zony – aktual'noe napravlenie v issledovanii Rossijskoj Arktiki // Rossijskij zhurnal prikladnoj jekologii. 2010. № 5. S. 50–59 (In Russian).
2. Darbinjan D.S., Kantarzhil I.G., Leont'ev I.O. Sopryazhenie s beregom sovremennyh morskikh truboprovodov//Litodinamika donnoj kontaktnoj zony okeana. Materialy Mezhdunarodnoj konferencii, posvjashhennoj 100-letiju so dnja rozhdenija professora V.V. Longinova [Lithodynamics of the ocean bottom contact zone. Materials of the International Conference dedicated to the centenary of the birth of Professor V.V. Longinov]. M.: GEOS, 2009. S. 77–79.
3. Mironjuk S. G. Beregovye primykaniya morskikh gazoprovodov: vybor tehnologii stroitel'stva s uchetom ocenki geologicheskikh opasnostej //Gazotransportnye sistemy: nastojashhee i budushhee: tezisy dokladov VI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii GTS-2015 (28–29 oktjabrja 2015 g.) [Gas transmission systems: present and future: abstracts of the VI International Scientific and Technical Conference GTS-2015 (October 28–29, 2015.)]. M.: Gazprom VNIIGAZ (Research institute of natural gases and gas technologies), 2015. S. 31.
4. Mironjuk S.G., Skvortsov S.V. Litodinamika berega i severo-vostochnoj chasti prisahalinskogo shel'fa (Ohotskoe more, Kirinskaja ploshhad')//Obespechenie gidrometeorologicheskoy i jekologicheskoy bezopasnosti morskoy dejatel'nosti [Ensuring hydrometeorological and environmental safety of marine activities]. Izdatel': Sorokin Roman Vasil'evich. Astrakhans'(Sorokin Roman Vasilievich), 2015. S. 129–130.
5. Ermolov A.A. Morfolitodinamicheskie issledovaniya v sostave inzhenernyh izyskanij dlja stroitel'stva // Inzhenernye izyskanija. 2014. № 9–10. S. 86–89 (In Russian).
6. Mironjuk S.G., Kasimova O.M. Primenenie dannyh distancionnogo zondirovaniya dlja ocenoch'nogo rajonirovaniya uchastkov beregovyh primykaniy truboprovodov// Zakonomernosti formirovaniya i vozdejstvija morskikh, atmosferynyh opasnyh javlenij i katastrof na pribrezhnuju zonu RF v uslovijah global'nyh klimaticheskikh i industrial'nyh vyzovov («Opasnye javlenija»): materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (g. Rostov-na-Donu, 13–23 ijunja 2019 g.) [Patterns of formation and impact of marine, atmospheric hazardous phenomena and disasters on the coastal zone of the Russian Federation in the context of global climatic and industrial challenges ("Hazards phenomena"): proceedings of the International Scientific Conference (Rostov-on-Don, June 13–23, 2019)]. Rostov n/D: Izd-vo JuNC RAN, 2019. S. 183–185.
7. Kuznecov D.E., Noskov A.I., Ogorodov S.A. Ispol'zovanie materialov raznovremennyh ajerokosmicheskikh s#emok v celjah issledovaniya dinamiki arkticheskikh beregov//Morskie berega – jevoljucija, jekologija, jekonomika: Materialy XXIV Mezhdunarodnoj beregovoj konferencii, posvjashhennoj 60-letiju so dnja osnovaniya Rabochej grupy «Morskie berega» (Tuapse, 1–6 oktjabrja 2012 g.) [Sea coasts – evolution, ecology, economy: Materials of XXIV International Coastal Conference, devoted to the 60th anniversary of the «Sea Coasts» Working Group of RAS Council (Tuapse, October 1–6, 2012); in 2 vol. Krasnodar: Izdatelskij Dom – Yug. Vol. 1. 2012]; v 2 t. Krasnodar: Izdatel'skij Dom – Yug. T. 1. 2012. S. 228–231.

8. *Afanas'ev V.V., Uba A.V.* Razmyv morskikh beregov severo-vostochnogo Sahalina // Geomorfologiya. 2018. № 4. S. 25–35 (In Russian).
9. *Cygankova A.E.* Metody analiza sputnikovyh izobrazhenij pri izuchenii dinamiki beregov severo-vostochnoj chasti Belogo morja//Litodinamika donnoj kontaktnoj zony okeana. Materialy Mezhdunarodnoj konferencii, posvjashhennoj 100-letiju so dnja rozhdenija professora V. V. Longinova [Lithodynamics of the ocean bottom contact zone. Materials of the International Conference dedicated to the centenary of the birth of Professor V.V. Longinov]. M.: GEOS. S. 161–163.
10. *Beloshapkov A.V., Gordin A.I., Il'in V.V., Putov V.F.* Akkumuljativnye formy pribrezhnoj zony i shel'fa severo-vostochnogo Sahalina // Chelovechestvo i beregovaja zona Mirovogo okeana v XXI veke [Humanity and the coastal zone of the oceans in the XXI century]. M.: GEOS, 2001. C. 126–140.
11. *Badjukova E.N., Zhindarev L.A., Luk'janova S.A., Solov'eva G.D.* Festony na beregah Kurshskoj i Vislinskoj kos (jugo-vostochnaja Baltika) // Sozdanie iskusstvennyh pljazhej, ostrovov i drugih sooruzhenij v beregovej zone morej, ozer i vodohranilishh [Creation of artificial beaches, islands and other structures in the coastal zone of the seas, lakes and reservoirs]. Izd-vo Irkutskogo universiteta. Irkutsk, 2013. S. 21–28.
12. *Afanas'ev V.V.* Morfolitodinamicheskie processy i razvitie beregov kontaktnoj zony subarkticheskikh i umerennykh morej Severnoj Pacifiki [Morpholithodynamic processes and coastal development of the contact zone of the subarctic and temperate seas of the North Pacific]. Juzhno-Sa IMGIG DVO RAN (Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences), 2020. 234 s.
13. *Afanas'ev V.V., Ignatov E.I., Chistov S.V.* Morfologija i dinamika beregov i dna proliva Nevel'skogo rajona proektirovanija postojannogo zheleznodorozhnogo perehoda [Morphology and dynamics of the coast and bottom of the Nevelsky Strait, designing a permanent railway crossing]. Smolensk: Madzhenta, 2008. 128 s.