УДК: 551.4, 528.8 **DOI:10.35595/2414-9179-2021-1-27-351-363**

А.А. Сучилин[1], Н.И. Белая[2], И.С. Воскресенский[1], С.Н. Михеева[1], В.В. Зорина[1], Л.А. Ушакова[1], В.М. Шафоростов[1], С.А. Сократов[1]

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ МОРФОЛОГИИ АБРАЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ БЕРЕГОВ ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА С ПРИМЕНЕНИЕМ БЛА И ГНСС (НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА ТЕРРИТОРИИ БОЛЬШОГО СЕВАСТОПОЛЯ)

*Памяти **Евгения Ивановича Игнатова***
выдающегося геоморфолога, исследователя морских берегов
Крыма, России и Мирового Океана

АННОТАЦИЯ

Методика изучения абразионно-аккумулятивного берега Западного побережья Крыма в пределах городской территории г. Севастополя включает дистанционное зондирование с применением беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и натурные исследования морфологии и строения абразионных и оползневых форм рельефа побережья. В результате исследований установлена морфологическая зональность абразионно-аккумулятивного берега. Формирование морфологической зональности абразионно-аккумулятивного берега (по И.С. Щукину) в течение последних 150 лет происходило при постоянном уровне Черного моря. Анализ берега по ранее изданным разновременным картам и аэрокосмическим фотоснимкам выявил различные этапы в перемещении береговой линии и оползневого уступа. Начиная с 1966 г., прибрежная территория используется для маловысотной жилой застройки, что, возможно, оказало влияние на активность оползневых процессов в прибрежной полосе. Дистанционное зондирование с применением БЛА состоит из аэросъемки участка исследований по спланированному маршруту полета на высотах 20–100 м с дальнейшим составлением крупномасштабного ортофотоплана из мозаики снимков с геопространственной фиксацией изображений к знакам опорной долговременной локальной геодезической сети, предварительно измеренным методами глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), а также формировании цифровой модели рельефа (ЦМР) и составления на ее основе производных карт и планов в среде геоинформационных систем (ГИС), для анализа морфометрии рельефа и моделирования. Разработанный метод дистанционного зондирования Земли с применением БЛА и одновременных натурных исследований позволяет организовать оперативный мониторинг динамично развивающихся абразионно-аккумулятивных берегов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: абразионно-аккумулятивный берег, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), беспилотные летательные аппараты (БЛА)

---

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mail:* **asuhov308@gmail.com, isvoskresensky@rambler.ru, arshinchik@mail.ru, victoria.zorina10@gmail.com, la.ushakova@mail.ru, gislabinfo@mail.ru, sokratov@geogr.msu.ru**
[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-учебный Музей Землеведения, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия; *e-mai:* **belayanadegda@mail.ru**

Aleksandr A. Suchilin[1], Nadezhda I. Belay[2], Ivan S. Voskresensky[1], Svetlana N. Mikheeva[1], Victoria V. Zorina[1], Lyudmila A. Ushakova[1], Victor M. Shaforostov[1], Sergey A. Sokratov[1]

METHODS FOR STUDYING THE MORPHOLOGY OF ABRASION-ACCUMULATIVE COAST OF THE WEST COAST OF THE CRIMEA USING UAV AND GNSS (ON THE EXAMPLE OF A LAND OF THE TERRITORY OF GREAT SEVASTOPOL)

ABSTRACT

The method of studying the abrasion-accumulative coast of the Western coast of Crimea within the urban area of Sevastopol includes remote sensing using unmanned aerial vehicles (UAVs) and field studies of the morphology and structure of abrasion and landslide landforms of the coast. As a result of the research, the morphological zoning of the abrasion-accumulative coast was established. The formation of the morphological zoning of the abrasion-accumulative coast (according to I.S.Shchukin) during the last 150 years took place at a constant level of the Black Sea. Analysis of the coast from previously published multi-temporal maps and aerospace photographs revealed different stages in the movement of the coastline and landslide scarp. Since 1966, the coastal area has been used for low-rise residential development, which may have influenced the activity of landslide processes in the coastal strip. Remote sensing using UAVs consists of aerial photography of the research area along the planned flight route at altitudes of 20–100 m, with further compilation of a large-scale orthophotomap from a mosaic of images with geospatial fixation of images to the signs of the reference long-term local geodetic network, previously measured by the methods of global navigation satellite systems (GNSS), as well as the formation of a digital elevation model (DEM) and the compilation of derived maps and plans on its basis in the environment of geographic information systems (GIS), for the analysis of the morphometry of the relief and modeling. The developed method of remote sensing of the Earth with the use of UAVs and simultaneous field studies makes it possible to organize operational monitoring of dynamically developing abrasion-accumulative shores.

KEYWORDS: abrasion-accumulative shore, Earth remote sensing (ERS), global navigation satellite systems (GNSS), unmanned aerial vehicles (UAVs)

ВВЕДЕНИЕ

Участок исследований абразионно-аккумулятивного берега – Учкуевский оползень, его размеры составляют: вдоль береговой линии – около 1000 м, а от подошвы уступа до береговой линии варьируются от 45–110 м.

Исследования проводились в течение 2019–2021 гг. коллективом сотрудников, магистрантов и студентов Географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, а также студентами кафедры геоэкологии и природопользования Филиала МГУ в г. Севастополь, в рамках научных программ кафедр картографии и геоинформатики, геоморфологии и палеогеографии, криолитологии и гляциологии.

[1] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **asuhov308@gmail.com, isvoskresensky@rambler.ru, arshinchik@mail.ru, victoria.zorina10@gmail.com, la.ushakova@mail.ru, gislabinfo@mail.ru, sokratov@geogr.msu.ru**

[2] Lomonosov Moscow State University, The Earth Science Museum at Moscow State University (The Museum of Natural History), Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia; *e-mail:* **belayanadegda@mail.ru**

В течение последних лет проведены исследования оползневых и делювиальных склонов с применением дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) и с использованием БЛА [*Воскресенский и др.*, 2018] в центре Русской Равнины в бассейне Верхней Оки, которые показали необходимость применения современного метода наблюдений для мониторинга естественного и антропогенного рельефа природных и природно-технических систем. По материалам исследований был разработан учебный межфакультетский курс, который читается с 2019 г. для студентов и магистрантов разных факультетов МГУ им. М.В. Ломоносова. Исследования проводились в рамках Государственного Задания (ГЗ) «Развитие методов и технологий картографии, геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях природы и общества». При увеличении антропогенной нагрузки, в связи со строительством инженерных сооружений различного назначения, возрастает актуальность разработки методики применения БЛА [*Курков и др*., 2016; *Westoby et al.*, 2012] и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для мониторинга эволюции рельефа абразионно-аккумулятивного берега западного побережья Крыма (рис. 1).

Рис. 1. Фрагмент перспективного снимка абразионно-аккумулятивного берега западного побережья Крыма (Учкуевский оползень, район мыса Толстяк)
Fig. 1. A fragment of a perspective image of the abrasion-accumulative coast of the western coast of Crimea (Uchkuevsky landslide, the area of Cape Tolstyak)

В состав западного побережья Крыма входят абразионно-аккумулятивные берега, которые обладают высоким потенциалом трансформации и занимают около 13 % длины береговой линии побережья [*Игнатов и др.,* 2016]. Побережью в районе г. Севастополь присущи формы рельефа типичные для абразионно-аккумулятивных берегов: береговые «террасы», поверхности конусов выноса, впадающих в море рек (Бельбек, Кача и др.), их уступы, эрозионные ложбины, клиф (абразионный уступ) и пляж [*Игнатов*, 2010; *Игнатов и др.*, 2014]. В настоящее время рельеф в прибрежной зоне трансформируется склоновыми процессами в сочетании с эрозией и ветровой дефляцией (в пределах суши).

В пределах абразионно-аккумулятивных берегов распространены формы рельефа, сформированные «активными» и «временно стабилизированными» оползнями «блокового», «потокового» и «смешанного» типов [*Опасные экзогенные процессы*, 1999; *Игнатов,*

Санин, 2011]. Морфология абразионно-аккумулятивных берегов зависит от литологии пород, участвующих в их строении: миоценовых галечников, относительно устойчивых к процессам абразии и эрозии, и менее устойчивых пород четвертичных суглинков и супесей. Последние в семиаридных климатических условиях Западного Крыма способны образовывать крутые отвесные уступы и денудационные останцы [*Мысливец и др.*, 2012]. Изменение пространственного положения береговой линии в сторону суши приводит к усилению абразии и активизации оползневых процессов на берегах [*Махаева*, 1968; *Игнатов и др.,* 2014]. Побережье с конца 60-х годов прошлого столетия интенсивно застраивается, что существенно меняет условия рельефообразующих процессов, в том числе условия оползания берегов [*Романюк, Покровский*, 1989].

Цель исследования – разработка методики изучения морфологии абразионно-аккумулятивных берегов западного побережья Крыма с применением БЛА и ГНСС (на примере Учкуевского оползня).

Задачи:

- воздушное зондирование участка исследования с применением БЛА и ГНСС, проведение одновременных полевых исследований;
- определение морфологических характеристик абразионно-аккумулятивного берега и этапов его формирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение морфологических характеристик абразионно-аккумулятивного берега включает:

1) Проведение натурных геоморфологических наблюдений. Они выполнялись в соответствии с общей методикой морфологического и морфометрического анализа рельефа, включая береговые морфосистемы [*Симонов*, 1998]. Исследование форм рельефа в береговой зоне осуществлялось с учетом особенностей рельефа абразионно-аккумулятивных берегов, в пределах которых сформирован парагенез элементарных форм рельефа склонового, флювиального и морского генезиса [*Игнатов*, 2004]. Наземные маршрутные наблюдения абразионно-аккумулятивного берега проводились по нерегулярной сетке. Они проходили одновременно со съемкой с БЛА. Маршруты прокладывались по характерным элементам рельефа: по бровкам террасовидных поверхностей, подножьям «денудационных останцов», днищам ложбин временных водотоков, перешейкам западин с ваннами озер и болотин.

2) Разбивка локальной геодезической сети на участке исследований. В ходе полевых работ 2019–2020 гг. на участке исследований заложена локальная долговременная опорная геодезическая сеть (рис. 2). Общее число точек опорной сети – более 30 знаков, включая знак ГГС, они размещены на «открытых» характерных формах рельефа исследуемого участка, что позволяет однозначно их дешифрировать на материалах зондирования БЛА.

Назначение локальной сети – картографирование и мониторинг динамики оползневых процессов на долговременный период. Измерения проводились высокоточными мобильными комплексом ГНСС («Leica Viva») и уравнивались в постобработке относительно трех референц-станций ГНСС («EVPT»-Евпатория, «SIMF»-Симферополь, «SEVS»-Севастополь), что позволило получить сантиметровую точность для координат точек опорной сети.

3) Зондирование участка исследований проводилось с помощью БЛА «DJI Mavic Air» и «DJI Mavic Mini» в автоматическом/ручном режиме, при средней высоте съемки около 20 м относительно бровки уступа (рис. 3), т.е. максимальная высота зондирования составила около 70 м от уровня моря. Было получено более 1500 снимков (86 галсов с перекрытием между снимками 60–70 %), которые затем были обработаны фотограмметрическим методом в программе «Leica Infiniti» с геопространственной привязкой к точкам опорной локальной сети.

Были рассчитаны связующие точки для стереопар снимков, а затем сформировано «плотное облако» точек, покрывающее территорию участка исследований. По результатам обработки мозаики снимков сформирована цифровая модель местности (ЦММ) и ортофотоплан, а после фильтрации артефактов с применением операции классификации на «плотном облаке», путем триангуляции с линейной интерполяцией, построена цифровая модель рельефа (ЦМР) участка исследований.

Рис. 2. Мобильный комплекс ГНСС «Leica Viva» на точке локальной геодезической сети на фоне «денудационного останца»
Fig. 2. Mobile GNSS complex «Leica Viva»at the point of the local geodetic network against the background of the «denudation outlier»

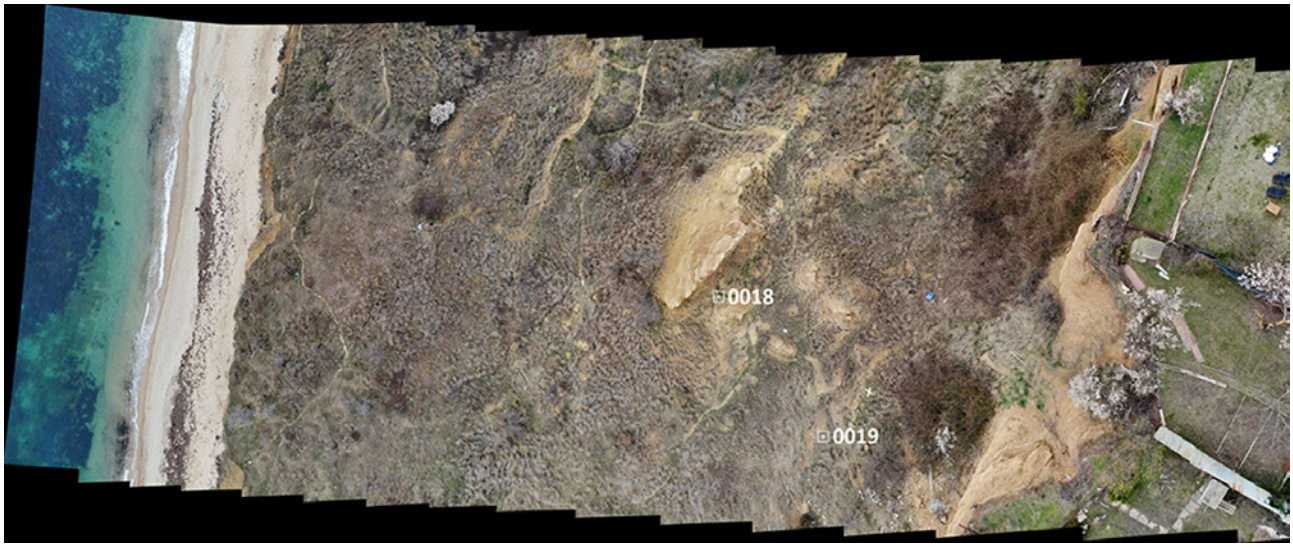

Рис. 3. Фрагмент одного из галсов зондирования с БЛА
Fig. 3. Fragment of one of the drone sounding tacks

Определение морфологии абразионно-аккумулятивного берега проведено в несколько последовательных этапов:

1) Составление топографического плана (масштаб 1:500/1:1000 и мельче) участка исследований проводилось на основании полевых измерений и по материалам зондирования с БЛА (ЦМР, ортофотоплан (рис. 4)), и сформировано на платформе геоинформационной системы (ГИС MapInfo), включая все исходные картографические источники и данные космического зондирования, которые ранее были трансформированы в заданную систему координат (UTM36) методом полиномиальной аппроксимации с точностью до 5 м, в зависимости от года издания ранних картографических источников. В среде ГИС, на «строгой» математической основе, составлен топографический план участка исследований с сечением рельефа 0.5 м и 1 м, отражающий ситуацию в виде горизонталей и условных знаков.

Использование в географических исследованиях общедоступных БЛА для оперативной аэросъемки локальных и труднодоступных территорий, а также для получения материалов заданной картографической точности, доказало свою эффективность. Точность высот ЦМР, при высоте съемки 50 м, составляет 10–12 см. Среднеквадратическая погрешность, при уравнивании и измерении на опорных точках, подтверждает данную точность, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к инженерно-топографическим планам масштаба 1:500 с сечением рельефа 0,5 м.

Рис. 4. Ортофотоплан участка исследований, составленный по результатам зондирования с БЛА
Fig. 4. Orthophotomap of the research area compiled based on the results of sounding from UAVs

2) Построение топографических профилей проводилось по составленной ЦМР в среде ГИС MapInfo. Профили пересекали абразионно-аккумулятивный берег от его бровки до его береговой линии (рис. 5). Местоположение профилей определялось, исходя из пересечения «элементарных поверхностей простых форм рельефа» на различных участках береговой зоны. Примеры двух из восьми построенных профилей приведены на рис. 5.

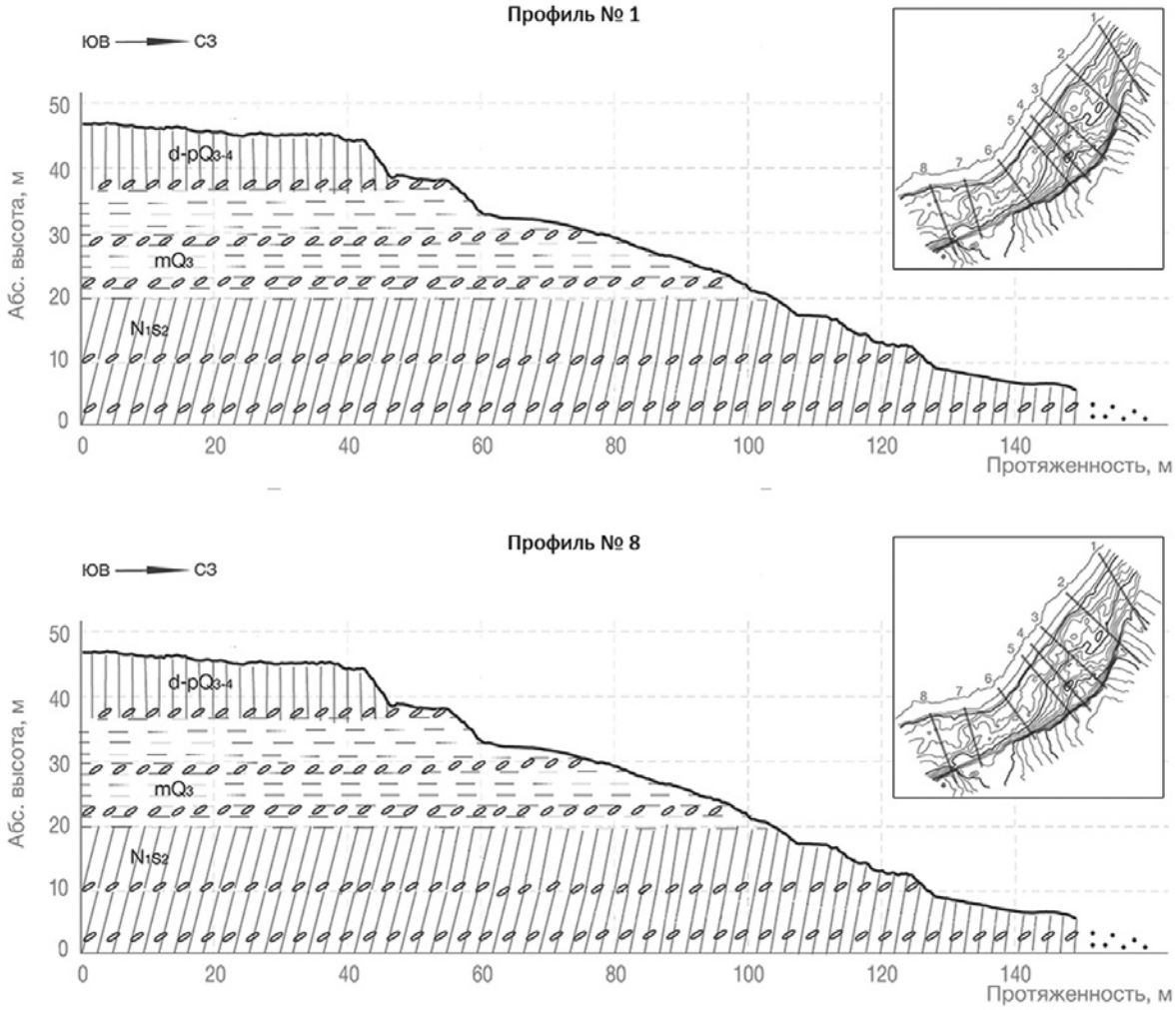

Рис. 5. Поперечные профили участка исследований (приведены 2 из 8 профилей)
Fig. 5. Transverse profiles of the research site (2 of 8 profiles are shown)

3) На топографических профилях выделялись террасовидные поверхности и уступы между ними (элементарные поверхности простых формы рельефа по А.И. Спиридонову), которые могут иметь оползневое, морское, эрозионно-аккумулятивное и структурно-литологическое происхождение. Критерий выделения «элементарной поверхности» принят равным 2 м, что соответствует 4 интервалам сечения на топографической карте.

4) Составление таблицы данных, сопоставление распределения морфометрического показателя (абсолютной высоты «элементарной поверхности») с интервалом абсолютной высоты залегания толщ горных пород и интервалом абсолютной высоты «элементарных поверхностей», установленного морского, флювиального (эрозионного) и склонового генезиса.

5) Определение «морфологической зональности» надводной части абразионно-аккумулятивного берега (по И.С. Щукину и Е.И. Игнатову) выполнялось при построении продольного профиля (см. рис. 8) исследуемого участка вдоль береговой линии. На продольный профиль «выносились» абсолютные высоты распространения «элементарных форм».

Определение стадий формирования морфологии абразионно-аккумулятивного берега проводилось в три этапа:

1 этап. Перед началом полевых исследований были изучены ранее изданные крупномасштабные картографические источники: карты XIX, XX веков и современные, а также внешние и собственные, источники ДДЗ. Анализ разновременных источников, ранее трансформированных в единую систему координат (с точностью до 5 м), наглядно показал эволюцию развития оползневых процессов участка исследований между уступом и побережьем. Для наглядности, на примере ниже локализованы на разновременных источниках в одном масштабе две точки (современное состояние): «КТ» – базовая точка локальной геодезической сети и точка «Останец» (рис. 6).

Рис. 6. Пример эволюции береговой линии и бровки уступа на разновременных источниках (фрагменты источников: 1886 – лист топографической карты издания 1886 г.; 1966 – космический снимок 1966 г.; 2020 – ортофотоплан, составленный по материалам зондирования БЛА)

Fig. 6. An example of the evolution of the coastline and the edge of the ledge on sources of different times (fragments of sources: 1886 – a sheet of a topographic map of the 1886 edition; 1966 – a satellite image of 1966; 2020 – an orthomosaic based on UAV sounding materials)

Кроме того, на листе карты 1886 года издания в границах участка исследований отмечен родник, которого ныне не существует в результате действия различных береговых процессов. Однако, в настоящее время, в основании уступа установлено место выхода водотока, ранее питавшего родник.

2 этап. На основании измерительных процедур в среде ГИС, между характерными элементами рельефа и береговой линией участка исследований в северо-западном направлении от «КТ», были получены численные величины (с точностью до 5 м), представленные в табл. 1.

Табл. 1. Измеренные характеристики
Table 1. Measured characteristics

	1886 г.	**1941 г.**	**1966 г.**	**1986 г.**	**2020 г.**
I	110 м	41 м	67 м	58 м	99 м
II	126 м	66 м	51 м	9 м	8 м

Примечание. **I** – дистанция от «КТ» до линии уреза воды, **II** – дистанция от «КТ» до бровки «террасы» уступа.

Полученные данные свидетельствует о параметрах динамики береговых морфосистем: скорости отступания береговой линии и скорости интенсивности оползневых процессов (обрушения, отседания и т.д.).

3 этап. Составление сводной схемы. Изменение в положении главных «точек», характеризующих состояние абразионного-абразионного берега: береговой линии, клифа (берегового уступа), береговой «террасы» (бровки оползневого склона). Погрешность в определении положения составляет 0.3–5 м, в зависимости от масштаба источников и методов их составления. Сводная схема соответствует положению поперечного профиля С-З направления от точки «КТ» (рис. 7).

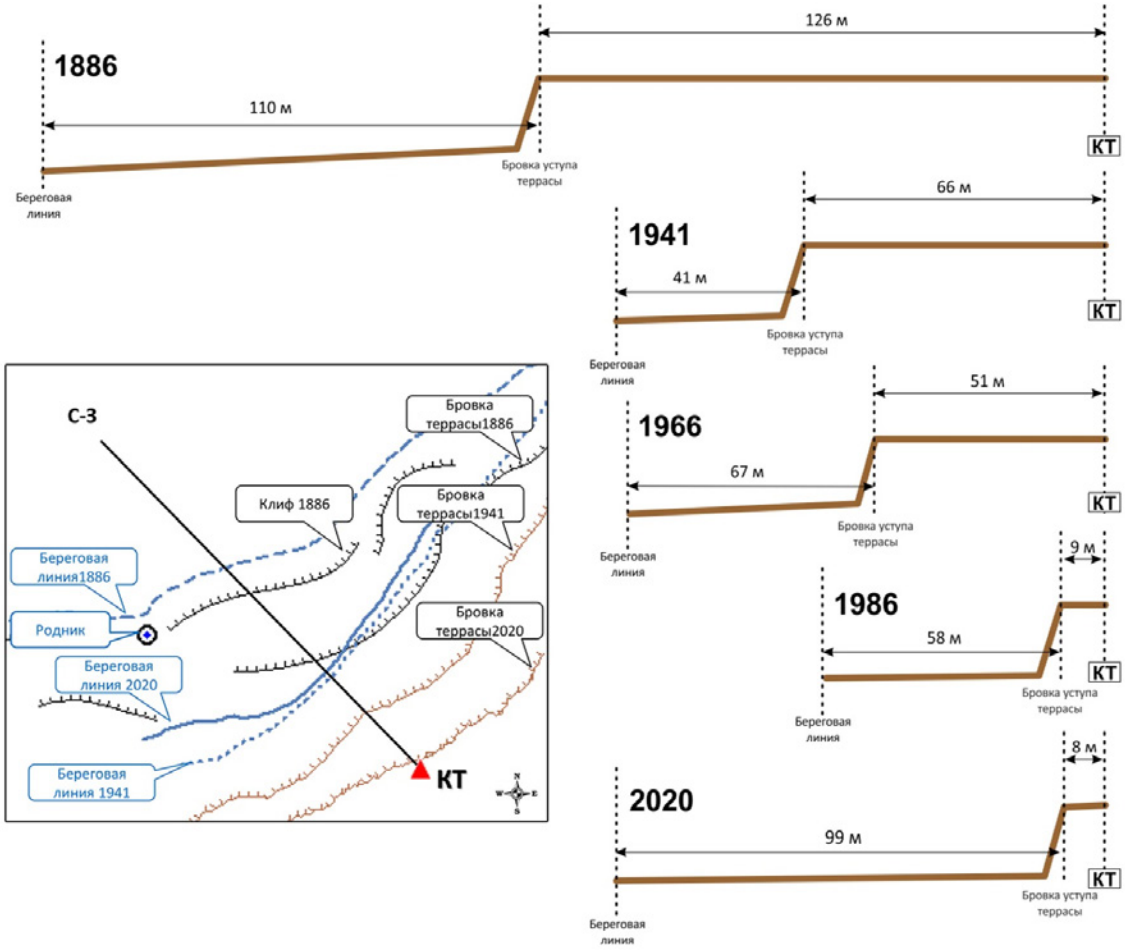

Рис. 7. Схематические профили динамики береговой линии и бровки уступа
Fig. 7. Schematic profiles of the dynamics of the coastline and the edge of the ledge

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

«Элементарные поверхности» (ЭП) (по А.И. Спиридонову) абразионно-аккумулятивного склона распространены на всем протяжении изученного участка (табл. 2).

В верхней части участка исследования протягивается «зона» крутых, практически отвесных, склонов – стенок отрыва (оползневой уступ). Его относительная высота – 6–10 м – близка мощности суглинков и супесей позднеплейстоценового возраста. Они залегают на морских галечниках с прослоями глин. В основании уступа установлены выходы грунтовых вод. Это позволяет предположить, что уступ соответствует стенке отрыва оползневого склона, т.е. является оползневым уступом. Следует указать, что в южной части участка (профиль 8, см. рис. 5), оползни скольжения захватывают морские галечники с прослоями глин. Таким образом, верхняя часть склона – это «зона оползневых уступов», оползней скольжения или сдвига. Ниже располагается зона аккумуляции оползневых тел, разрушенных, как правило, до

глыб и менее, четвертичных суглинков и супесей. Аккумулятивная толща состоит из «блоков» супесей и суглинков, а также содержит небольшие фрагменты обломков зданий.

Табл. 2. Морфометрия «элементарных поверхностей» (по А.И. Спиридонову) участка абразионно-аккумулятивного берега между поперечными профилями
Table 2. Morphometry of "elementary surfaces" (according to A.I. Spiridonov) the area of the abrasion-accumulative coast between the transverse profiles

№ профиля	Террасовидные поверхности, абс. высота в м.							Наклонные поверхности – склоны террасовидных поверхностей, абс. высота в м					
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.
1	44	38	34	18	14	8	–	44–38	38–34	34–18	18–14	14–8	8–2к
2	46	24	10	8	6	6	–	46–24	24–10	10–8	8–6	–	6–2к
3	47	32о	26о	22	8	8	4	48–30	30–26	26–22	22–8	8–4	4–2к
4	48	36о	42о	22	12	6	–	48–32	36–26	26–22	22–12	12–6	6–2к
5	46	26	22	14	6	–	–	46–26	26–22	22–6	–	–	6–2к
6	36	16	12	6	–	–	–	36–26	26–16	16–12	12–6	–	6–2к
7	28	20	16	8	6	–	–	28–20	20–16	16–8	8–6	–	6–0к
8	38	18	16	10	–	–	–	38–18	18–16	16–10	–	–	10–0к

Примечание. «26о» – абсолютная высота вершины денудационного «останца» на террасовидной поверхности; 10-0к – абсолютная высота бровки клифа (берегового уступа) и его подножья (уреза моря на профилях 7–8 или верхней части пляжа на профилях 1–6).

Рис. 8. Морфологическая зональность участка исследований
Fig. 8. Morphological zoning of the study area

«Морфологическая зональность» (по И.С. Щукину) абразионно-аккумулятивного берега характерна для изученного участка «береговой морфосистемы» (по Е.И. Игнатову). Она выражается в устойчивых сочетаниях элементарных форм рельефа (ЭФР, по А.И. Спиридонову) и последовательной смены от бровки «террасы» до береговой линии (рис. 8).

ЭФР представлены как:

1) фрагменты поверхности междуречья малых долин (ММД), впадающих в море на исследованном участке отн. высотой до 40–48 м над уровнем моря, которые располагаются между ложбинами, открывающимися на береговую линию моря. Поверхность ММД в сторону моря ограничена вертикальным уступом, высота которого достигает 10–15 м и более. В основании уступ, как правило, переходит в наклонную поверхность. Конус выноса сложен толщей четвертичных суглинков и супесей мощностью до 10 м. Ниже залегает толща галечников четвертичного возраста, абсолютная высота кровли которых составляет около 30 м абс. высоты. Под ними до уреза моря в пределах склона залегают терригенно-карбонатные породы миоцена, абсолютная высота кровли которых составляет около 20 м, и к ней приурочены выходы грунтовых вод. Поверхность ММД занята малоэтажной застройкой и грунтовыми дорогами. Отдельные сооружения, расположенные в прибровочной части, в настоящее время разрушены частично или разрушаются в результате отседания и оползания;

2) террасовидными пологоволнистыми поверхностями с отн. превышениями в их пределах не более 2 м и разделяющими их уступами (отн. высотой не менее 2 м);

3) конусовидными (до 10 м отн. высоты и более) и изометричными (до 4–6 м отн. высоты) плосковершинными денудационными останцами (до 4–6 м отн. высоты);

4) западины и ложбины отн. глубиной до 2–3 м с временными водотоками, озерками и болотами;

5) современный клиф (абразионный уступ), относительная высота которого изменяется от 2–3 м до 4–5 м и редко более. В нижней части клифа располагается волноприбойная ниша. Между клифом и урезом моря протягивается галечный пляж шириной до 20–70 м. В абразионном уступе вскрываются суглинки, супеси с прослоями галечников. Встречается антропогенный материал – обломки керамической плитки. На отдельных участках клиф сложен прочными терригенно-карбонатными породами миоцена, а галечный пляж отсутствует.

Вдоль всего склона протягивается третья «зона» ЭП. Размах абсолютных высот этой «зоны» достигает 20–25 (см. рис. 5). В ней широкие субгоризонтальные поверхности отделены друг от друга с узкими (по падению) склонами (таблица 2). Относительные превышения между сопряженными субгоризонтальными поверхностями, как правило, не более 2–4 м. Над террасовидными поверхностями возвышаются денудационные останцы или блоки отседания (в настоящий момент их происхождение установить не удалось), они сложены суглинками и супесями, которые обнажаются в оползневом уступе конуса выноса. На космическом снимке 1966 г. отчетливо видно, что «останец» еще примыкает к массиву ММД (см. рис. 6)

Террасовидные поверхности на участке между 1 и 5 профилями приурочены к толще четвертичных галечников с прослоями глин, а между 6 и 8 профилями – к толще коренных миоценовых пород. Это позволяет предположить, что субгоризонтальные поверхности ММД сложены четвертичными отложениями (галечники, супеси, суглинки), относительно устойчивыми к процессам денудации. Наиболее существенные отличия отмечены между северным и южным участками берега. В северной части между клифом и береговой линией протягивается галечный пляж шириной 40–70 м. В поднимающемся над пляжем береговом уступе (клифе) обнажаются рыхлые отложения. Разнообразие и изменчивость литологического состава пород, «вогнутые» границы между слоями, изменчивость ориентировки обломков позволяют предположить, что в береговом уступе вскрываются фронтальные части оползней потоков. Предположение подтверждается находками обломков керамической плитки, т.е. строительного материала сооружений, ранее расположенных в прибровочной части

«террасы» и разрушенных при оползании. Нижняя зона южной части участка (профиль 8) характеризуется относительно высоким береговым уступом (до 8 м), в котором обнажаются коренные дочетвертичные породы.

История формирования исследованного участка абразионно-аккумулятивного берега. В рельефе изученного участка абразионно-аккумулятивного берега отражается история изменения положения береговой линии и уступа ММД в течение 150 лет. История перемещения береговой линии включает три этапа: 1) перемещение береговой линии в 1886–1941 гг. (от ее положения в 1886 г.) на 150 м в сторону суши; 2) относительно стабильное положение в 1941–1986 гг.; 3) перемещение в 1986–2020 гг. на 39 м в обратном направлении в сторону акватории. История перемещения оползневого склона включает два этапа: 1) перемещение уступа в 1886–1986 гг. на 117 м в сторону суши; 2) относительно стабильное положение в 1986–2020 гг. Предполагается, что замедление отступания оползневого склона связано с изменением динамики береговых процессов. Это возможно для абразионно-аккумулятивных типов берегов западного побережья Крыма в районе г. Севастополь.

Результаты проведенных исследований не позволяют оценить влияние малоэтажной застройки после 1966 г. и до настоящего времени на скорость отступания оползневого склона.

Таким образом, морфологическая зональность северного и южного участков имеет сходство в числе морфологических зон. Отличие заключается в том, что на южном участке (профиль 8) в настоящее время происходит активная абразия основания склона, а на северном участке формируется пляж (профиль 1, см. рис. 5).

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика исследования морфологии и эволюции абразионно-аккумулятивного берега с применением БЛА, ГНСС, ДДЗ. Методика содержит особенности организации съемки исследуемого оползневого участка берега с последующей послойной интеграцией на платформу ГИС.

2. Совокупность применения БЛА и ГНСС позволяет оперативно выявлять изменения в морфологии рельефа берега, дистанционно получить их детальные количественные характеристики и осуществлять оперативный мониторинг.

3. Установлена морфологическая зональность абразионно-аккумулятивного берега: оползневой уступ междуречья малых долин, террасовидные поверхности с денудационными останцами или блоками отседания, береговой уступ (клиф), пляж. Морфологическая зональность отражает современные оползневые и эрозионные процессы в пределах западного побережья Крыма в районе г. Севастополя, а также его эволюцию в течение последних 150 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воскресенский И.С., Сучилин А.А., Ушакова Л.А., Шафоростов В.М., Энтин А.Л.* Применение БЛА для мониторинга оползневых и эрозионных процессов (на примере центра Русской Равнины). Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях. Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б Сочавы СО РАН, 2018. С. 42–47.

2. *Игнатов Е.И.* Береговые морфосистемы. Москва-Смоленск: Маджента, 2004. 352 с.

3. *Игнатов Е.И.* Современное состояние береговой зоны Черного моря вдоль юго-западного Крыма. Причерноморский экологический бюллетень. 2010. № 1 (35). С. 102–120.

4. *Игнатов Е.И., Санин А.Ю.* Оползневой рельеф береговых морфосистем Южного берега Крыма. Мат-лы 2-й междунар. конф. «Создание и использование земельных участков на берегах морей и искусственных водоемов». Новосибирск: ИВП СО РАН, 2011. С. 17.

5. *Игнатов Е.И., Орлова М.С., Санин А.Ю.* Береговые морфосистемы Крыма. Севастополь: ЭКОСИ-Геофизика, 2014. 265 с.

6. *Игнатов Е.И., Лукьянова С.А., Соловьева Г.Д.* Морские берега Крыма. Геоморфология. Москва, 2016. № 1. С. 55–63.

7. *Курков В.М., Бляхарский Д.П., Флоринский И.* Применение беспилотной аэрофотосъемки для геоморфометрического моделирования. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2016. Т. 60. № 6. С. 69–77.
8. *Махаева Т.В.* К геоморфологии и динамике берегов Западного Крыма. Геология побережья и дна Черного и Азовского морей в пределах УССР. Киев: Изд-во Киевского. Ун-та, 1968. Вып. 2. С. 160–166.
9. *Мысливец В.И., Коротаев В.Н., Зверев А.С., Федин М.В., Федин М.М.* К геоморфологии берегов Севастополя. Морские берега – эволюция, экология, экономика. Мат-лы XXIV Береговой конф. Т. 1. Туапсе, 1–6 октября 2012 г. Краснодар: РГГМУ, 2012. С. 265–268.
10. *Романюк О.С., Покровский А.Э.* Составление кадастра надводной части берегов Крыма, применительно к масштабу 1:200 000. Симферополь: ЭКОСИ–Геофизика, 1989. 214 с.
11. *Симонов Ю.Г.* Морфометрический анализ рельефа. Москва-Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. 272 с.
12. *Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. «*Structure-from-Motion» photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology. 2012. V. 179. P. 300–314.

REFERENCES

1. *Ignatov E.I.* The costal morfosistems. Moscow-Smolensk: Madgenta, 2004. P. 352. (in Russia).
2. *Ignatov E.I.* The modern state of the Black Sea coastal zone a long southwestern Crimea Black sea. Environmental bulletin. 2010. No. 1 (35) P. 102–120. (in Russia).
3. *Ignatov E.I., Lukyanova S.A., Solovieva G.D.* The seashores of the Crimea Geomorfologia. Moscow, 2016. No. 1. P. 55–63. (in Russia).
4. *Ignatov E.I., Sanin A.Y.* The landslide relief of coastal morphological systems of the southern coast of Crimea. Materials of the 2nd international conference. «Creation and use of land plots on the shores of the seas and artificial reservoirs» Novosibirsk: IVP SO RAN, 2011. P. 17. (in Russia).
5. *Ignatov E.I., Lukyanova S.A., Solovieva G.D.* Seashore of Crimea. Geomorphology. Moscow, 2016. No. 1. P. 55–63. (in Russia).
6. Kurkov V.M., Blyakharskiy D.P., Florinsky I.V. Application of unmanned aerial surveying for geomorphometric modeling Proceedings of high schools. Geodesy and Aerophotosurveying. 2016. V. 60. No. 6. P. 69–77. (in Russia).
7. *Mahaeva T.V.* On geomorphology and dynamics of the coast of the western Crimea. Geology of coast and bottom of the Black and Azov seas within the Ukrania USSR. Kiev University Publishing House, 1968. Iss. 2. P. 160–166. (in Russia).
8. *Myslivec V.I., Korotaev V.N., Zverev A.S., Fedin M.V., Fedin M.M.* On the geomorphology the coast of Sevastopol. Sea coasts-evolutlion, ecology, economy. Materials XXIV coastal conference V.I. Tuapse 1–6 October, 2012. Krasnodar: RGGMU, 2012 P. 265–268. (in Russia).
9. *Romanyuk O.S., Pokrovskyi A.E.* The drawing up a cadastre of the surface part of the Crimean coast Simferopol: EKOS–Geofizika, 1989. P. 214. (in Russia).
10. *Simonov Y.G.* Morphometric analysis of the relief. Moscow-Smolensk: SSU Publishing house, 1998. P. 272. (in Russia).
11. *Voskresensky I.S., Suchilin A.A., Ushakova L.A., Shaforostov V.M., Entin A.L.* The application of UAV for erosion and landslide processes monitoring (case study of the central part of the Russian Plane).The use of unmanned aerial vehicles in geographical research. Irkutsk: Publishing House of the Institute of Geography V.B. Sochava SB RAS, 2018. P. 42–47. (in Russia).
12. *Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M.* «Structure-from-Motion» photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology. 2012. V. 179. P. 300–314.