

# ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ДИНАМИКИ АБРАЗИОННО-ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

**В.С. Исаев** (МГУ имени М.В. Ломоносова)

Доцент кафедры геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Кандидат геолого-минералогических наук.

**Е.И. Игнатов** (МГУ имени М.В. Ломоносова)

С 1963 г. по 2020 г. работал на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова. Доктор географических наук.

**А.А. Новиков** (Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова, Севастополь)

Старший преподаватель кафедры геоэкологии и природопользования факультета естественных наук филиала МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Е.С. Каширина** (Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова, Севастополь)

Старший преподаватель кафедры геоэкологии и природопользования факультета естественных наук филиала МГУ имени М.В. Ломоносова. Кандидат географических наук.

**Р.М. Аманжуров** («Современные Геотехнологии»)

Инженер-геодезист ООО «Современные Геотехнологии».

**Е.И. Горшков** (Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова, Севастополь)

Старший преподаватель кафедры географии океана факультета естественных наук филиала МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Р.В. Вербовский** («АртГео»)

Ведущий специалист по направлению беспилотные летательные аппараты компании «АртГео».

Берег черноморского побережья характеризуется активным протеканием ряда опасных экзогенных процессов. На территории городов в прибрежной зоне отмечаются обвально-осыпные, оползневые, карстово-суффозионные, абразионные экзогенные процессы. Ситуация осложняется расположением городов в зоне с сейсмичностью 8 баллов.

В некоторых крупных городах протяженность береговой линии моря (вместе с гидротехническими сооружениями) составляет 172 км, при этом более половины ее относится к абразионному типу. С расширением городской застройки в соответствии с генеральными планами развития городов в прибрежной зоне особую актуальность представляют комплексные исследо-

вания экзогенных процессов в узкой прибрежной полосе. В связи с интенсивными обвально-осыпными абразионными процессами происходит активное разрушение берегового уступа и отступление береговой линии. Высокие скорости отступления берега активизируют оползневые процессы в береговых уступах, сложенных рыхлыми малосвязанными алевритами

и алевритистыми глинами с песчано-галечниковыми линзами. Наличие обводненного горизонта в основании таврских отложений способствует интенсивному оползанию блоков с формированием многоступенчатых оползней.

Дополнительным фактором, влияющим на резкое увеличение как количества оползней, так и на их масштабы, является хозяйственная деятельность в приоползневой зоне. Недостаток точных данных не позволяет с высокой точностью определить факторы активизации опасных экзогенных процессов в прибрежной зоне.

В настоящее время при активном освоении прибрежных территорий изыскатели, проектировщики и строители сталкиваются с комплексом проблем, связанных с получением архивных данных по объекту, со сбором достоверных полевых данных в рамках инженерно-геологических изысканий, с проведением квалифицированной обработки полевых данных и, наконец, с созданием трехмерной цифровой инженерно-геологической модели объекта исследований, отражающей его рельеф (цифровую модель рельефа — ЦМР) и литологическое, гидрологическое, структурное строение (инженерно-геологические элементы). Такая цифровая модель является основой для разработки проектно-технической документации будущих сооружений на основе технологии информационного моделирования в строительстве, принятия решений по существующим объектам, находящимся в зоне геориска, прогноза развития опасных геологических процессов в береговой зоне.

В статье представлены результаты определения пространственных параметров и временной динамики проявления опасных геологических процессов в прибрежной зоне, включая данные лазерного сканирования. Работа выполнена в рамках

практики «Береговые процессы: мониторинг и инновационные комплексные исследования» бакалавров филиала МГУ имени М.В. Ломоносова в 2016–2021 гг.

#### ▼ Район и методы исследования

В качестве ключевых были выбраны участки, характеризующиеся развитием обвально-осыпных оползневых и абразионных процессов и максимальной скоростью отступления берегов. Берег сложен таврской свитой, состоящей из чередования желтовато-бурых светлых алевритов и алевритистых глин и характерных более тонких слоев, окрашенных в красновато-бурый или ярко красный цвет.

Берег в этой части абразионно-аккумулятивный, выровненный, сложенный песчаными наносами и галькой. Ландшафт местности ковыльно-степной, равнинно-балочный. Ключевой участок в береговой полосе характеризуется интенсивными гравитационными (оползни и обвалы) и абразионными процессами.

Для определения величины антропогенного изъятия грунта был выбран экспериментальный участок местности с условным названием Балка, прилегающий к береговой полосе (рис. 1). В зимний период 2017–2018 гг. северный борт участка был срезан на половину высоты и террасирован.

После выбора участков с объектами исследований был разработан комплекс инженерно-геологических и инженерно-геодезических изысканий, основанный на цикличности измерений наиболее динамически меняющихся параметров изучаемых объектов — береговой линии, поверхности на суше, поверхности морских отложений, уровня грунтовых вод в массиве пород.

Комплекс инженерных изысканий включал следующие инструментальные методы исследований.



**Рис. 1**  
Экспериментальный участок Балка по состоянию на 2017 г. (вверху) и на 2019 г. (внизу)

Инженерно-геодезические:

— ежегодная аэрофотосъемка земной поверхности цифровой камерой, установленной на беспилотном воздушном судне (БВС), для обновления и пополнения данных о характере качественных изменений поверхности исследуемых объектов;

— съемка земной поверхности с помощью беспилотной системы воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки DJI Zenmuse L1 и беспилотной системы аэрофотосъемки DJI Zenmuse P1 для оперативной и качественной оценки динамики изменения оползневых процессов исследуемых объектов (2021 г.);

— ежегодная съемка земной поверхности системой наземного лазерного сканирования в период с 2016 г. по 2020 г. для исследования количественных изменений поверхности в субсантиметровом диапазоне;

— определение пространственного положения береговой линии методом дифференциального геопозиционирования с помощью приемников ГНСС для исследования количественных изменений границы береговой

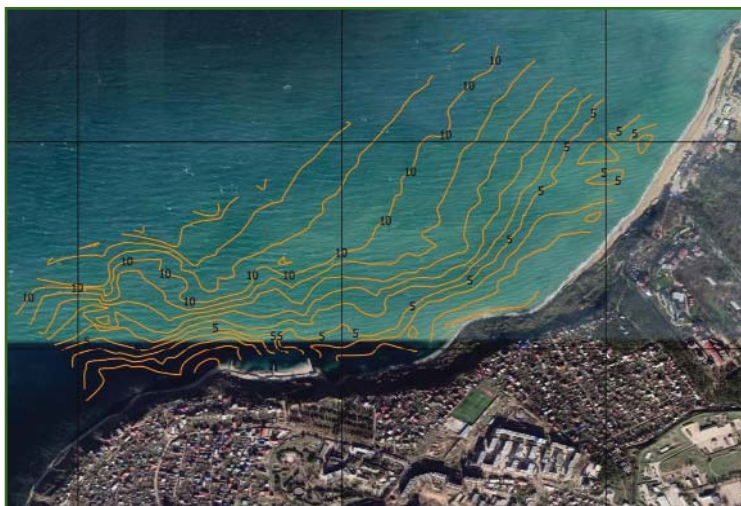
линии с меньшей дискретностью, чем наземное лазерное сканирование, однако достаточной для качественной оценки динамики отступления берегов;

— батиметрическая съемка морского дна для создания полной картины массопереноса грунта в береговой зоне исследуемых участков.

Инженерно-геологические:

— электротомография (один из методов геофизических исследований) позволяла понять пространственную неоднородность оползневых и обвальносипных массивов пород, выделить границу обводненных грунтов, сопоставить валидационные данные инженерно-геологического бурения с полученной геофизической моделью массива грунта;

— бурение скважин и отбор монолитов грунта использовались для последующего определения в полевой лаборатории физико-механических свойств грунтов.



**Рис. 4**

*Результаты батиметрической съемки морского дна в прибрежной зоне Балки*

В период 2016–2020 гг. аэрофотосъемка выполнялась цифровой камерой с разрешением 20 Мп, установленной на БВС. Полученные данные проходили фотограмметрическую обработку в программах PhotoScan и DJI Terra. Результатом аэрофото-

съемки стало изображение оползневых участков (рис. 2).

Съемка участка, прилегающего к береговой линии в районе Балки, выполнялась с 40 точек наблюдения с использованием наземного лазерного сканера. Точки установки сканера были привязаны в местной системе координат методом дифференциального геопозиционирования. Была отсканирована береговая линия длиной около 350 м с клифом, тальвег балки, а также южный задернованный и северный террасированный борта Балки. В результате измерений получены облака точек лазерных отражений (ТЛО) с пространственными координатами (X, Y, Z). Эти данные после обработки в программе TerraScan позволили построить трехмерную цифровую модель рельефа (ЦМР) участка побережья в районе Балки (рис. 3).

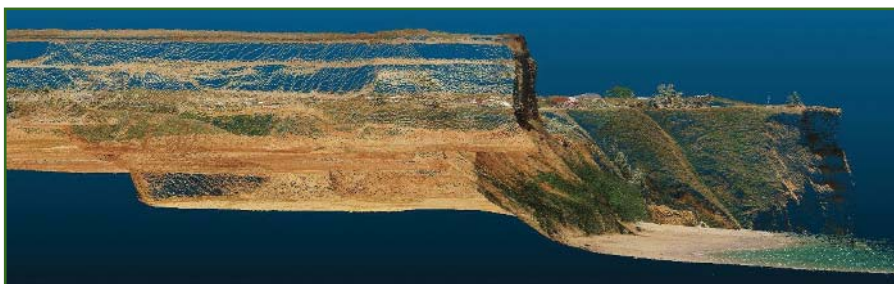
Батиметрическая съемка морского дна в прибрежной зоне проводилась с использованием эхолота и двухлучевого глубинного локатора бокового обзора с последующей обработкой полевых данных в программе AquaScan. Результаты батиметрической съемки представлены на рис. 4.

Бурение трех скважин было проведено по профилю от тыло-



**Рис. 2**

*Изображение участка вдоль береговой линии по результатам аэрофотосъемки*



**Рис. 3**

*ЦМР участка побережья в районе Балки*

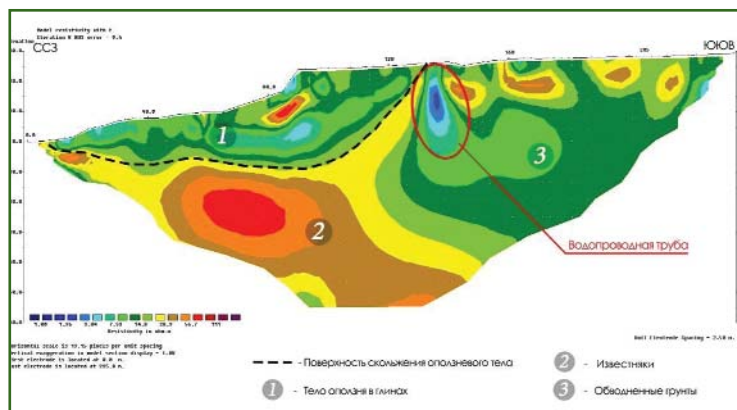


вого шва оползневого тела в районе спуска к береговой линии, далее в центральной части оползневого тела в непосредственной близости от останца берегового уступа и, наконец, во взбросовой части оползня. В ходе работ был отобран и описан керн, зафиксированы глубины вскрытия подземных водоносных горизонтов, отмечен контакт с подстилающим дисперсными породами горизонтом коренных карбонатных отложений.

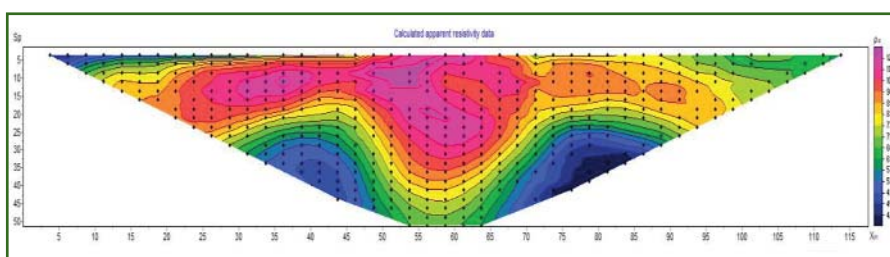
Монолит грунта для определения физико-механических свойств грунта был отобран на клифе в июне 2019 г. в соответствии с ГОСТ12071–2014. Лабораторные исследования физико-механических характеристик грунта проводились по ГОСТ 5180–2015 и ГОСТ 12248–2010, в ходе которых были определены: влажность, плотность, пористость, сцепление и др. Тип грунта — глина пылеватая легкая твердая при природной влажности 7,6% имеет плотность 1,93 г/см<sup>3</sup> со следующими прочностными характеристиками: угол внутреннего трения  $\phi = 27^\circ$ , а величина удельного сцепления грунта  $C = 13$  кПа.

В районе спуска к береговой линии выполнены геофизические исследования методом электротомографии с целью изучения строения геоэлектрического разреза, оконтуривания границы и определения параметров оползневого тела, его глубины залегания, протяженности и определения поверхности скольжения оползня.

Для этих целей использовалась многоканальная электротомографическая станция SYSCAL Pro Switch-48. По результатам геофизических исследований построен геоэлектрический разрез и выполнена его геолого-геофизическая интерпретация (рис. 5). Интерпретация выполнена по имеющимся полевым данным инженерно-геологического бурения, проведенного авторами в районе исследова-



**Рис. 5**  
Геолого-геофизическая интерпретация геоэлектрического разреза



**Рис. 6**  
Геоэлектрический разрез по данным электротомографии по продольному профилю

ний. Направление разреза совпадает с вероятным направлением смещения оползня, которое определяется максимальными значениями углов наклона поверхности скольжения.

На разрезе выделяется тело оползня в глинах (область 1), коренные породы, представленные известняками (область 2) и обводненные грунты (область 3). Выделенная поверхность скольжения оползня имеет длину 145 м, ее глубина от поверхности земли в наиболее широком месте составляет 35 м.

Измерения методом электротомографии проводились по продольному профилю, где ранее была выполнена сейморазведка. Для измерений использовался электроразведочный комплекс ЭНИКС. В результате был получен геоэлектрический разрез, характеризующий распределение удельного электрического сопротивления пород по продольному профилю балки по направлению от моря (рис. 6). На разрезе выделяется высоко-

омная аномалия с максимальной мощностью в центре профиля.

▼ **Изменения в методологии выполнения работ в 2021 г.**

Описанные методы аэрофотосъемки и наземного лазерного сканирования не являются оптимальными для подобной работы. Данные аэрофотосъемки с БВС, полученные в результате фотограмметрической обработки, обладают рядом существенных недостатков:

- невозможно получить истинную модель рельефа на участках с растительностью (значительная часть исследуемых объектов покрыта растительностью);

- невозможно получить приемлемую по детальности модель вертикальных поверхностей формации (клиф, откосы обрывов, отдельные останцы и др.);

- сложно обеспечить получение однородных и высокого качества (лучше 10 см) материалов в результате съемок разных лет.

Получение данных методом наземного лазерного сканирования также связано с рядом сложностей:

- высокая трудоемкость на объектах с изрезанным рельефом;

- большое количество «теней» и «мертвых зон», в которых отсутствует информация о рельефе (особенно в лесу и на застроенных территориях);

- высокий риск для жизни сотрудников, выполняющих съемку участков, находящихся в зоне возможных обвалов;

- трудно обеспечить установку сканера в тех же точках, что и в предыдущие годы, что может привести к выявлению ложной динамики в ландшафте, вызванной наличием «мертвых зон» на сканах.

Совместное использование данных аэрофотосъемки и наземного лазерного сканирования помимо перечисленных выше недостатков приводит дополнительно к следующим проблемам:

- необходимость взаимосвязки при объединении данных;

- невозможность контроля одного вида данных с помощью другого вида данных — наземное лазерное сканирование обеспечивает лучший результат на вертикальных поверхностях, где данные аэрофотосъемки фактически недостоверны, а аэрофотосъемка дает лучший результат на застроенных территориях, где данные лазерного сканирования имеют огромное количество «мертвых зон».

В 2021 г. для изучения процессов динамики клифа было решено использовать квадрокоптер DJI Matrice 300 RTK с беспилотной системой воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки DJI Zenmuse L1 (рис. 7) и с беспилотной системой аэрофотосъемки DJI Zenmuse P1 (рис. 8).

Беспилотная система DJI Zenmuse L1 с блоком подвески, включающим LIDAR для воздушного лазерного сканирования и



**Рис. 7**

*Беспилотная система воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки DJI Zenmuse L1, установленная на квадрокоптере DJI Matrice 300 RTK*



**Рис. 8**

*Беспилотная система аэрофотосъемки DJI Zenmuse P1, установленная на квадрокоптере DJI Matrice 300 RTK*

RGB-камеру для аэрофотосъемки, имеет следующие технические характеристики:

- масса блока подвески — 900 г;

- дальность распознавания ТЛО — 190–450 м;

- точность измерения ТЛО — 3 см на 100 м;

- число лазерных отражений — до 3;

- точность дальномера LIDAR — 30 мм;

- угол обзора — 70,4°x77,2°;

- RGB-камера с разрешением 20 Мп (пропорции кадра 4:3 и размером 4864x3648 пикселей или 3:2 и 5472x3648 пикселей, соответственно);

- точность инерциальной системы — 0,080° по курсу и 0,025° по крену / тангажу.

Блок подвески беспилотной системы аэрофотосъемки DJI Zenmuse P1 включает полнокад-

ровую камеру с разрешением 45 Мп с пропорциями кадра изображения 3:2, размером кадра 8192x5460 пикселей, сменными объективами — 24, 35 и 50 мм. Масса блока подвески с системой аэрофотосъемки DJI Zenmuse P1 составляет 800 г.

Совместное использование DJI Matrice 300 RTK с DJI Zenmuse L1 и DJI Matrice 300 RTK с DJI Zenmuse P1 позволяет получать точки лазерных отражений и цифровые фотоснимки объектов исследования с расстояния 200 м, а большой угол обзора сканера DJI Zenmuse L1 обеспечивает съемку не только горизонтальных, но и вертикальных поверхностей. Время работы DJI Matrice 300 RTK до 40 минут без подзарядки батарей гарантирует высокую производительность за один вылет. Программные средства планиро-

вания траектории полета обеспечивают выполнение более 10 вылетов в течение светлого времени суток.

Обработка точек лазерных отражений и фотоснимков проводится в программе DJI Terra, которая обеспечивает как расчет траектории, так и вывод ТЛО, уравнивание фотоснимков, окрашивание облака точек по фото, вывод данных в виде итоговых поверхностей или облаков точек. DJI Terra позволяет создать ортофотопланы (для плоских поверхностей) или текстуры (для вертикальных или замкнутых объектов).

Беспилотная система воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки DJI Zenmuse L1 была впервые использована при мониторинге объектов в 2021 г. Работа велась с высоты полета 70 м, что обеспечило получение фотоснимков с разрешением около 1 см. Сканирование велось в режиме «три отражения» с частотой 480 тыс. точек в секунду. Для съемки каждого из объектов потребовалось 2 вылета, всего было сделано 4 вылета.

Следует отметить, что точность системы лазерного сканирования, заявленная производителем, имеет значительный запас, так как реальная точность траектории полета комплекса была лучше 1,5 см, а точность ТЛО по контрольным точкам в пределах 1–1,5 см. Все полевые работы по получению пространственных данных о состоянии объектов в районе исследований заняли 1 рабочий день. На обработку данных (вывод облака точек, создание ортофотопланов, текстур, 3D поверхностей) потребовалось всего 2 рабочих дня, при этом время работы оператора составило не более 4 часов (рис. 9).

Одновременное получение и фотоснимков и облаков точек лазерных отражений является очень ценным качеством. Скорость и простота ведения работ обеспечивает возможность фиксации состояния местности с

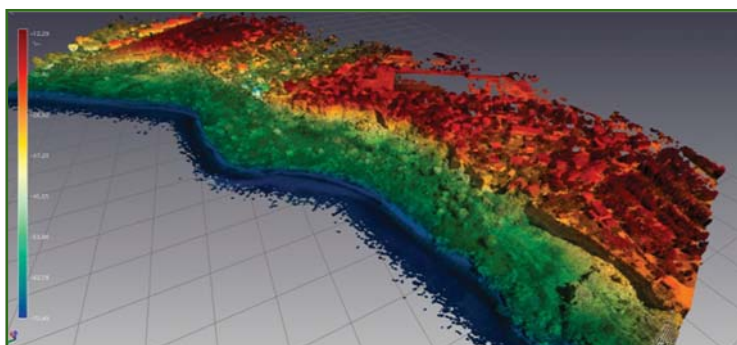


Рис. 9

*Окрашенное облако точек объектов исследования*



Рис. 10

*Точки лазерных отражений на территорию населенного пункта*



Рис. 11

*Точки лазерных отражений на участках прибрежной зоны с вертикальными поверхностями склонов*

периодичностью один раз в 2–4 недели, что особенно важно после прохождения особо интенсивных воздействий на прибрежные участки (штормы, экстремальные осадки, прочее). Использование БВС с лазерным сканером и фотокамерой значительно снижает опасность и риск для жизни, так как нет необходимости находиться непосредственно на участках, подверженных обвальным процессам. На рис. 10–11 приведены

данные, полученные беспилотной системой воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки DJI Zenmuse L1 после постобработки в программе DJI Terra. Нетрудно увидеть, что данные воздушного лазерного сканирования обеспечивают покрытие территории населенного пункта ТЛО с незначительным количеством «мертвых зон» и хорошо отображают вертикальные поверхности склонов на участках прибрежной зоны.



### ▼ Анализ результатов работ, выполненных в период 2016–2021 гг.

На территории экспериментального (модельного) участка — Балки были проведены измерения наземным лазерным сканером в 2016–2020 гг. Полученные данные, показали изменения пространственного положения Балки в результате антропогенной и природной нагрузки.

Расчет устойчивости берегового уступа проводился по данным геофизических работ и лабораторных исследований грунта. Поверхность скольжения была аппроксимирована до системы плоских поверхностей, исходя из чего оползневое тело было разбито на 6 блоков (рис. 5).

Для расчета устойчивости оползневого склона был выбран метод Р.Р. Чугаева, так как поверхность скольжения оползневого тела определили ранее при помощи метода электротомографии. По результатам расчета был получен коэффициент устойчивости ( $K_u$ ) данного оползневого тела в природных условиях, равный 2,25.

Также расчетно-аналитическим путем при известном изменении главных прочностных характеристик (удельного сцепления и угла внутреннего трения), полученных на образцах керна и монолита в лаборатории ООО «Петромоделлинг» и определенных там же значениях естественной относительной влажности, была рассчитана относительная влажность грунта, при которой оползневой склон утратит равновесное положение.

Таким образом, выявлено, что при достижении относительной влажности 25,6% данный оползневой склон будет находиться в состоянии предельного равновесия и с дальнейшим увеличением влажности приобретет неустойчивое положение ( $K_u$  станет меньше 1).

Кроме того, при расчете устойчивости оползневого склона учитывалась поправка на сейсмичность района исследования. Положение участка соответствует районам с сейсмичностью 8–9 баллов согласно комплектам карт ОСР-2016. Поэтому коэффициент устойчивости был рассчитан с учетом сейсмиче-

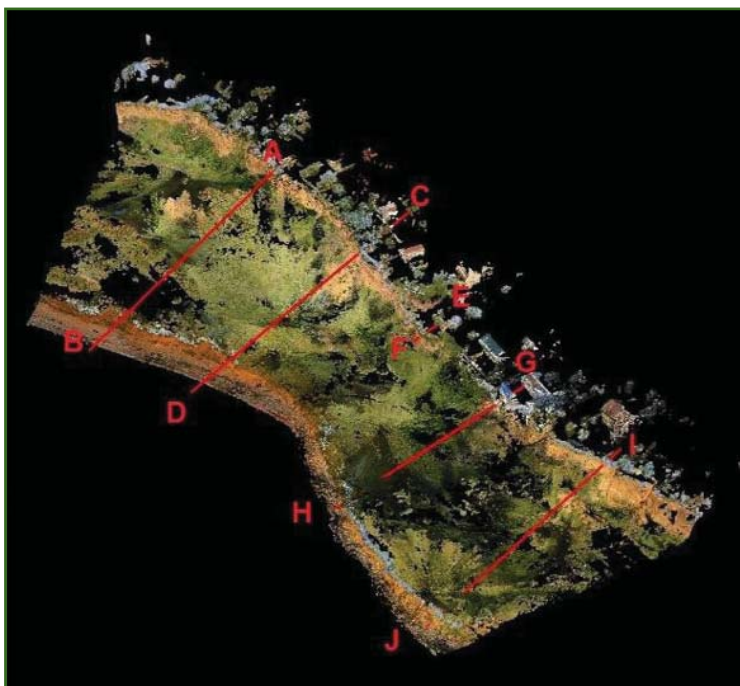
ского воздействия: при 7 баллах  $K_u$  данного оползневого тела равен 1,04, при 8 баллах — 0,97, при 9 баллах — 0,85.

Оценка динамики изменения рельефа побережья в районе береговой полосы проведена по ЦМР, построенной по результатам наземного лазерного сканирования (рис. 12). Рассмотрено пять поперечных профилей, расположение которых соответствует участкам разной интенсивности разрушения клифа.

По материалам 2016–2020 гг. видно, что бровка берегового уступа отступала в среднем на 0,8 м в год. На профиле D–C зафиксирован участок максимальной активности обвальноподолзневых процессов на береговой полосе в 2017 г. Размер блока оседания, отколовшегося от бровки уступа в 2017 г., составил 4,6–4,8 м. Горизонтальные параметры разрушения верхней части клифа за 2016–2017 гг. достигли 4 м.

Наземное лазерное сканирование позволило определить морфометрические параметры не только блоков оседания. Так, на профиле H–G наблюдается проседание склона, т. е. сокращение объемов склонового материала. Максимальный размер проседания за период с июля 2016 г. по июль 2020 г. составил более 2 м, причем в период с 2016 г. по 2017 г. максимальная величина смещения по вертикали горизонтальной поверхности клифа составила 0,2 м.

Абразия в период осенне-зимних штормов, а также вдольбереговые течения приводят к размыванию накопленных оползневых масс в пределах береговой полосы. Летом этот процесс затухает, из-за ослабления ветровой активности, однако на отдельных участках побережья фиксируется смещение линии уреза вод и в теплое время года. При сканировании территории в районе береговой линии, были выделены участки максимального разрушения берега морской волной, которое



**Рис. 12**

Расположение профилей на ЦМР, построенной по данным наземного лазерного сканирования

достигло 20 см за период лето 2016 г. — осень 2018 г. (рис. 13).

За указанный период максимальный размыв берега достигал 5 м. Участки максимального разрушения берегов на ЦМР в районе исследуемой береговой полосы расположены в его средней и западной частях.

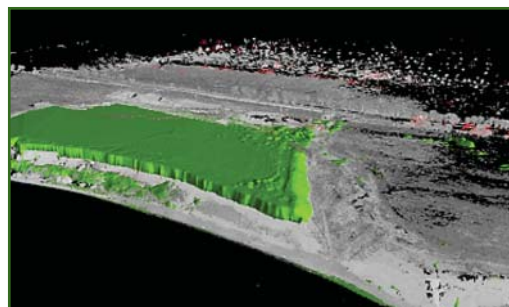
Район Балки является модельным для оценки как природных процессов отступления берега, так и антропогенного разрушения берегов. По данным лазерного сканирования в 2017 г. и 2018 г., построены цифровые модели рельефа и совмещенная модель. На рис. 14 приведен поперечный разрез, построенный по совмещенной модели, на котором ярко прослежены изменения рельефа, произошедшие в результате экзогенных процессов и антропогенного вмешательства.

Как видно из модели, в результате террасирования участка на северном борту Балки образовался антропогенный «вырез» длиной около 150 м и шириной около 300 м. Глубина «выреза» составила от 10 м у

бровки над береговой линией и 2,5 м у края со стороны дороги.

Для определения объема вывезенного грунта и грунта, который образовался в результате оползней и осыпей, построена объемная фигура. Для наглядности фигура загружена в облако точек, полученное в 2018 г. Разница очертаний рельефа между 2017 г. и 2018 г. показана зеленым цветом (рис. 15).

Расчет в программе TerraScan по данным лазерного сканирования показал, что объем вывезенного грунта составляет 422 318 м<sup>3</sup>, а образовавшегося из-за осыпания кромки карьера — 28 669,62 м<sup>3</sup>. При этом часть материала в аккумулятивных телах у подножия клифа накопилась в результате строительных работ и антропогенного перемещения грунта. Необходимо отметить наличие временной тенденции к расширению берегов напротив устьевого участка Балки, что объясняется перераспределением вдольбереговыми течениями дополнительных масс грунта, поступающих на подвод-

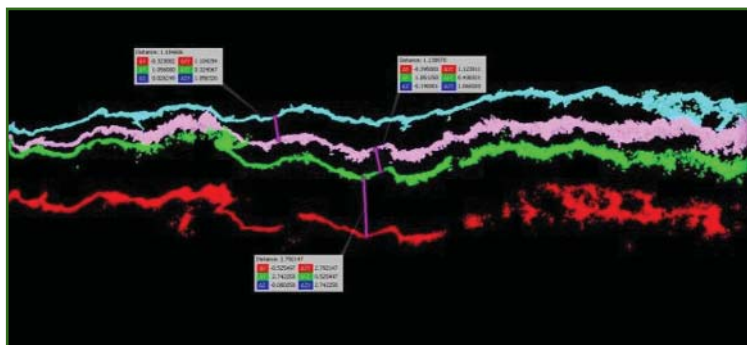


**Рис. 15**  
Объем вывезенного грунта (выделен зеленым цветом), 2017–2018 гг.

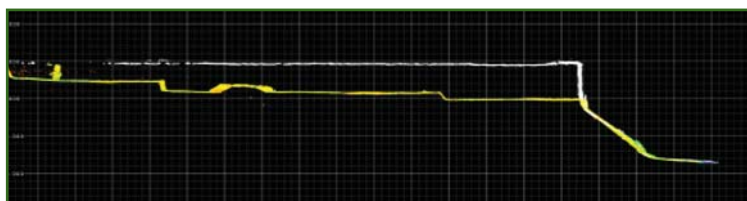
ную часть побережья в результате абразии этих аккумулятивных тел, оказавшихся в волноприбойной зоне береговой полосы.

Таким образом, полученные в ходе исследований результаты работ, выполненных в 2016–2021 гг., могут быть использованы для мониторинга опасных экзогенных процессов, моделирования и прогнозирования развития берегов и принятия решений для управления природопользованием в прибрежной зоне. Кроме того, данные мониторинга, полученные беспилотной системой воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки DJI Zenmuse L1 позволяют оперативно и с высокой точностью оценить природную и антропогенную динамику берегов, отличающихся локализацией различных экзогенных процессов и представляющих угрозу для хозяйственной деятельности населения.

Они также указывают на необходимость проведения циклического мониторинга опасных экзогенных геологических процессов в соответствии с разработанным комплексом инженерно-геологических изысканий, математического моделирования устойчивости береговой зоны и прогнозирования динамики изменения береговой линии. Результаты комплексных исследований должны лечь в основу принятия научно-обоснованных решений для городских управлений природопользованием и при утверждении генерального плана развития города.



**Рис. 13**  
Береговая линия летом 2016 г. (красная линия), летом 2017 г. (зеленая линия), летом (лиловая линия) и осенью (синяя линия) 2018 г.



**Рис. 14**  
Поперечный разрез совмещенных цифровых моделей Балки за 2017 г. (белая линия) и 2018 г. (желтая линия)