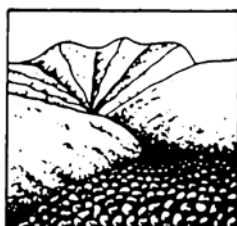


СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
8-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 6–10 октября 2025 г.



Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2025

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 8th International Conference

Tbilisi, Georgia, 6–10 October 2025



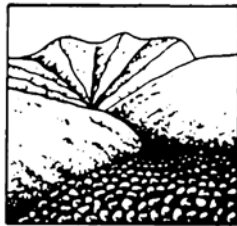
Edited by
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2025

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

მე-8 საერთაშორისო კონფერენციის
მასალები

თბილისი, საქართველო, 6-10 ოქტომბერი, 2025



რედაქტორები
ს. ს. ჩერნომორეც, გ. ვ. გავარდაშვილი, კ. ს. ვისხაჯიევა

შპს „გეომარკეტინგი“
მოსკოვი
2025

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2025. 496 с.

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC, 2025. 496 p.

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მე-8 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო. – პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი, კ.ს. ვისხაჯიევა. – მოსკოვი: შპს „გეომარკეტინგი“, 2025. 496 ს.

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), Г.В. Гавардашвили (Институт водного хозяйства имени Цотне Мирцхулава Грузинского технического университета), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (M.V. Lomonosov Moscow State University), G.V. Gavardashvili (Tsotne Mirtskhulava Institute of Water Management, Georgian Technical University), K.S. Viskhadzhieva (M.V. Lomonosov Moscow State University).

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).

Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman's book on Debris Flows (Moscow: Geografgiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-5-6053539-4-2

© Селевая ассоциация
© Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава
Грузинского технического университета

© Debris Flow Association
© Ts. Mirtskhulava Water Management Institute
of Georgian Technical University

© ღვარცოფების ასოციაცია
© საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა
მეურნეობის ინსტიტუტი



Субаквальные сели на континентальном склоне в северо-восточной части Черного моря: анализ условий и причин образования

С.Г. Миронюк

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва,
Россия, mironyuksg@gmail.com*

Аннотация. Выполнен анализ условий и основных причин формирования субаквальных селей вдоль трасс двух магистральных газопроводов в пределах континентального склона Восточно-Черноморской впадины. Дана подробная характеристика геологической среды их образования. Рассмотрены особенности рельефа, строения и состава осадочного чехла и коренных пород, склоновые процессы, предшествующие возникновению подводных селей, а также, в качестве, основной причины их развития на материковом склоне морей зон коллизии, параметры землетрясений. Дана характеристики сейсмических событий воздействующих на устойчивость осадков и горных пород в верхней части геологического разреза. Приведен пример, иллюстрирующий ситуацию, когда небольшое по силе землетрясение с $M < 5$ вызвало смещение горных пород. Подробно описаны формы микро-и мезорельефа в полосе строительства газопроводов. Указана морфология подводных каньонов. Приведены примеры, доказывающие образование субаквальных плотностных потоков и в настоящее время. К их числу относятся: следы эрозии донной поверхности, экстремальные скорости течений, обрывы кабельных линий. Сравнительный анализ инженерно-геологической обстановки формирования субаквальных селей показал, что масштабы склоновых процессов, включая квазиселевые потоки, обусловлены в основном силой землетрясения, а их тип морфологией склона и составом слагающих его осадков и пород.

Ключевые слова: *Черное море, континентальный склон, подводные каньоны, обвалы, оползни, субаквальные сели, генезис гравитационных потоков, опасность, трубопроводы*

Ссылка для цитирования: Миронюк С.Г. Субаквальные сели на континентальном склоне в северо-восточной части Черного моря: анализ условий и причин образования. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 8-й Международной конференции (Тбилиси, Грузия). – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2025, с. 316–327.

Subaqueous debris flows on the continental slope of the north-eastern part of the Black Sea: analysis of conditions and causes of formation

S.G. Mironyuk

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, mironyuksg@gmail.com

Abstract. The article presents the analysis of conditions and main causes of formation of subaqueous debris flows along the routes of two main gas pipelines within the continental slope of the East Black Sea Depression. A detailed description of the geological environment of their formation is given. The article considers the features of the relief, structure and composition of the sedimentary cover and bedrock, slope processes preceding the occurrence of underwater debris flows, as well as earthquake parameters as the main cause of their development on the continental slope of the seas of collision zones. The article presents the characteristics of seismic events affecting the stability of sediments and rocks in the upper part of the geological section. An example is given illustrating the situation when a small earthquake with $M < 5$ caused a displacement of rocks. The forms



of micro- and mesorelief in the gas pipeline construction strip are described in detail. The morphology of underwater canyons is indicated. Examples are given proving the formation of subaqueous density flows at the present time. These include: traces of bottom surface erosion, extreme current velocities, and cable line breaks. A comparative analysis of the engineering and geological conditions of subaqueous debris flow formation showed that the scale of slope processes, including quasi-debris flows, are determined mainly by the strength of the earthquake, and their type by the slope morphology and composition of the sediments and rocks that make it up.

Key words: *Black Sea, continental slope, submarine canyons, collapses, landslides, subaqueous debris flows, genesis of gravity flows, danger, pipelines*

Cite of this article: Mironyuk S.G. Subaqueous debris flows on the continental slope of the north-eastern part of the Black Sea: analysis of conditions and causes of formation. In: Chernomorets S.S., Gavardashvili G.V., Viskhadzhieva K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 8th International Conference (Tbilisi, Georgia). Moscow: Geomarketing LLC, 2025, p. 316–327.

Введение

В начале статьи несколько замечаний относительно термина «субаквальные сели». Склоновые гравитационные процессы в водной (субаквальной) среде в научной литературе нередко обозначают терминами «субаквальные сели», «подводные сели», тем самым подчеркивая определенное сходство между селевыми потоками на суше и субаквальными перемещениями осадочного материала. Отмечается также, что отложения субаквальных селей являются аналогом пролювиальных отложений суши. В терминологическом словаре В.Ф. Перова дано развернутое определение термина «субаквальные сели» (submarine debris flows) в котором, путем перечисления ряда признаков, раскрывается его содержание [Перов, 1996]. В «целях упорядочения представлений о многообразии форм проявления селевого процесса на Земле» указанным автором разработана типология селевых и селеподобных потоков [Перов, 2012]. По составу и плотности в субаэральной среде (поверхность суши) в группе собственно селевых потоков выделены грязекаменный, водокаменный типы селей и селевой паводок. Им соответствуют два основных субаквальных типа гравитационных потоков, выделенных Дж. Кеннетом [Кеннет Дж., 1987]: потоки высокой плотности ($1,5\text{--}2,4\text{ г/см}^3$), включая грязекаменные (обломочные) (debris flow), зерновые потоки (grain flow) и разжиженного осадка (fluidized sediment flow) и потоки низкой плотности ($1,03\text{--}1,30\text{ г/см}^3$), собственно турбулентные мутьевые потоки (турбидитные или суспензионные потоки). Подчеркивается, [Перов, 2012] что «двум главным типам селей на суше (грязе- и водокаменным) соответствуют два типа таковых в субаквальной среде», а «значения плотности соответствующих типов селей на суше и дне океана весьма близки». «Это свидетельствует, с одной стороны, о близости процессов рельефообразования на поверхности суши и дне моря и с другой – о глобальном характере селевого процесса» заключает автор. К аналогичному выводу, в свое время, пришел В.В. Лонгинов [Лонгинов, 1973], утверждая, что собственно гравитационные процессы в водах Мирового океана принципиально не отличаются по своему проявлению от соответствующих процессов на суше. Не радикально отличается от вышеописанных взгляд А.П. Лисицына на особенности развития подводных склоновых процессов [Лисицын, 1988]. К собственно подводным селям по мнению А.П. Лисицына следует относить потоки разжиженного осадочного материала с ламинарным течением (грязекаменные (обломочные), зерновые и др.), но не турбидитные. Первые несут грубый материал со значительной скоростью, плотность их достигает $2,0\text{--}2,5\text{ г/см}^3$, они способны преодолевать расстояние в сотни километров, редко до 1000 км и более. Обладая большей разрушительной силой, именно эти потоки являются наиболее частой причиной обрывов подводных кабелей, эрозии подводных каньонов, переноса крупных и гигантских глыб [Лисицын, 1988]. Имеются участки склонов, генерирующие в



основном турбидиты и участки, порождающие преимущественно потоки типа селя. К последним относятся крутые склоны, с многочисленными обрывами, где за счет энергичного перемешивания с водой происходит трансформация оползня в разжиженную массу подводного селя [Лисицын, 1988].

Принято считать, что формирование подводных гравитационных потоков разного типа наиболее часто происходит в случае разрушения подводных обвальных масс и оползневых тел по мере их насыщения водой и продвижения вниз по склону. Следующие основные причины (триггеры) порождают обрушение или оползание склона, вызывающее, в свою очередь, образование обломочных потоков с ламинарным течением, а затем, при полной дезинтеграции оползневых или обвальных масс, и турбидных течений: 1) землетрясения и вторичные сейсмические эффекты (являются ключевым фактором возникновения подводных оползней в сейсмоактивных районах); 2) сеймотектоническое или эрозионное увеличение крутизны склона; 3) перегрузка осадков на склоне с последующим увеличением порового давления и уменьшением эффективных напряжений; 4) рост соляных или глиняных диапиров; 5) сильное штормовое волнение, цунами, приливно-отливные течения; 6) разгрузка подземных вод (родниковый подмыв); 7) выход (выброс) газов на морском дне в очагах разгрузки флюидов; 8) деятельности придонных сверлящих организмов [Ионов, 2012; Ионов, 2022; Миронюк и др., 2024; Мусаев и др., 2007; Селли, 1989; Чистяков и др., 1984; Щукин, 1974].

Наземные оползни и обвалы, а также селевые потоки, экстремальные паводки и половодья, достигая водного объекта, могут при определенных условиях генерировать плотностные потоки (рис. 1).



Рис. 1. «Залповый» вынос взвешенного материала речными водами (устье р. Туапсе, июль 2007 г.). Речные воды могут трансформироваться в плотностные потоки (гиперпикнальные), когда их плотность в устье реки выше, чем плотность воды в морском бассейне

О случаях селевых выносах в береговую зону Черного моря в районе Большого Сочи с последующим их распространением в зону континентального склона имеется упоминание в работе [Шуляков и др., 2015].

К числу условий формирования оползней и субаквальных гравитационных потоков большинство авторов [Ионов, 2012; Ионов и др., 2012; Москаленко и др., 2005; Чернявский, 2010; Шеко, 1980; Шуляков и др., 2015], исходя из многолетнего опыта изучения субаэральных и морских гравитационных процессов, относят: геологическое строение склонов (петрографический состав горных пород, условия их залегания и трещиноватость), рельеф, современные и новейшие тектонические движения и сейсмические явления, гидрогеологические явления, гидрологическая обстановка, процессы седиментации (оползни типичны для районов лавинной седиментации), особенности свойств, состава и состояния (например, наличие многолетнемерзлых пород) осадков и горных пород, слагающих склон (в том числе и их газонасыщенность), развитие сопутствующих экзогенных геологических процессов и явлений. Со временем при благоприятном сочетании указанных условий возникает ситуация, когда склон



становится столь неустойчивым (состояние предельного равновесия), что любой триггер (например, землетрясение или шторм) способен привести грунты в движение (когда касательные напряжения, обусловленные действием силы тяжести, превышают силы сцепления, препятствующие сдвигу).

Под природными условиями, способствующими образованию склоновых геологических процессов, будем понимать всю совокупность природных факторов и предпосылок, которые увеличивают в склоне компоненту суммы сдвигающих сил, нарушающих устойчивость грунтов. Представляется целесообразным из всей совокупности условий, способствующих образованию склоновых процессов, выделить две категории – региональных и местных (локальных) условий. Необходимо отметить, что возникновение оползней всегда обусловлено совокупным действием группы факторов, которые формируют благоприятные условия для формирования оползневого тела, а причины непосредственно приводят к смещению (сползанию) масс осадков и/или горных пород вниз по склону. При этом одни группы факторов влияют на пространственное распространение оползней (например, сейсмичность территории, рельеф и др.), а другие – на их развитие во времени [Шуляков и др., 2015]. При прогнозе развития склоновых процессов для целей проектирования сооружений необходимы детальные данные инженерно-геологических изысканий, характеризующие как причины их образования, так и условия, способствующие развитию деляпсивных процессов. Не всегда этот принцип строго выполняется. Ниже представлены материалы, отражающие опыт комплексных инженерно-геодинамических исследований вдоль трасс двух трубопроводов, пересекающих континентальный склон в северо-восточной части Черного моря, с акцентом на изучение ведущих условий и причин формирования гравитационных потоков.

Оценивая их опасность, обычно на практике рассматривают два наиболее распространенных типа гравитационных потоков наносов: обломочные и турбидные. Если определить тип осадочных масс не представляется возможным, используют термин «плотностные потоки», «mass-transport deposit» (MTD) и др.

Методы и район исследований

Одной из важнейших задач региональной морской инженерной геодинамики является задача изучения закономерностей распространения геологических опасностей (геоопасностей) в различных морфологических зонах морского дна и их картирование. Особенно сложно, как в техническом, так и в методическом планах, эта проблема решается в морях котловинного типа, материковый склон которого изобилует подводными каньонами и крутыми уступами.

Первые специальные инженерно-геологические изыскания в северо-восточной части Черного моря, в том числе для обоснования трасс глубоководных выпусков промстоков курортов Абхазии и Краснодарского края, относятся к 70–80-х гг. [Джанджгава, 1975]. В 1997–1998 гг. в рамках реализации проекта строительства глубоководного газопровода Россия-Турция («Голубой поток»), на шельфе (район п. Джубга), континентальном склоне и в пределах субабиссальной равнины были выполнены обширные исследования геоопасностей с целью выбора наиболее безопасной трассы газопровода. Лишь часть обширного материала по проекту «Голубой поток», освещающая вопросы субаквальной геодинамики опубликована на русском языке [Айбулатов, 2002; Лисицын, 2000; Лобковский и др., 2002; Осипов, 1999].

Инженерно-геологические изыскания в глубоководной части Черного моря (континентальный склон, субабиссальная равнина) выполняли, в основном, зарубежные компании. В их состав входили следующие виды работ: геофизическая и инженерно-геологическая съемка (NESA, Fugro Engineers B.V.), сейсмическая съемка высокого разрешения (Fugro-Geoteam), оценка сейсмической опасности (EQE), устойчивости склонов (Delft Geotechnics). К изучению крупных оползней была привлечена компания Woodward Clyde Consultants. Функции супервайзера выполняла компания Fugro Engineers B.V. (FEBV), она же осуществляла пробоотбор, полевые (статическое



зондирование) и лабораторные испытания грунтов. Видеосъемка вдоль трассы выполнялась с помощью ТНПА “Low Fly”.

Маршрутные видеонаблюдения проводились с одновременно выполняемых батиметрической съемкой, записью данных гидролокатора бокового обзора (ГЛБО) и донного профилографа. ГЛБО работал на частоте 100 кГц, а профилограф на частоте от 2 до 7 кГц. Высота ТНПА над морским дном во время обследования составляла 10–25 м, а дальность действия ГЛБО в каждую сторону 90–125 м.

С точки зрения сложности инженерно-геологических условий, проектирования и строительства морской участок газопровода «Южный поток» находился в более неблагоприятных условиях по сравнению с построенным газопроводом «Голубой поток» [Серебряков, 2020].

Работы по выявлению геоопасностей вдоль трассы газопровода выполнялись в 3 этапа. На начальном этапе в рамках прединвестиционных исследований в результате выполненного анализа фондовых материалов предпочтительными в части минимизации геологических опасностей было намечено два варианта и несколько подвариантов трассы газопровода. В дальнейшем, по завершению данного этапа, дополнительный анализ имеющихся материалов позволил оптимизировать маршрут прохождения трассы и обосновать оптимальные объемы оценочных (рекогносцировочных) изысканий.

Оценочные изыскания на предварительно выбранной трассе выполнялись с применением многолучевого эхолота (МЛЭ) «Reson SeaBat 8160» и узколучевого параметрического профилографа «Innomar SES 2000 medium». Съемка рельефа дна МЛЭ обеспечила построение цифровой модели рельефа (ЦМР). Основные технические характеристики профилографа следующие: первичная частота (высокочастотный канал) 100 кГц; вторичная частота (низкочастотный канал) 6–12 кГц. Для предварительного расчленения геологического разреза на отдельные слои и оценки свойств грунтов использовалась система статического зондирования Neptune 5000 и пробоотбор с помощью гравитационных трубок.

На этапе детальных комплексных изысканий (2010–2013 гг.) съемка рельефа выполнялась с использованием автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). МЛЭ, гидролокация бокового обзора (ГЛБО) и непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП) регистрировались одновременно. Ширина участка съемки – 1 км вдоль трассы трубопровода, расстояние между профилями – 200 м, высота хода АНПА – 45–50 м. НСП: полоса частот 1–6 кГц. Глубина проникновения – до 80 м, вертикальная разрешающая способность – 0,3 м. ГЛБО: частота – 100 кГц, полоса обзора – 295 м в каждую сторону. МЛЭ: Simrad EM 2000, частота излучения 2 кГц, количество лучей – 111, угол развертки – 150°. Размер ячейки матрицы – 5 x 5 м.

В рамках детальных изысканий на одной из площадок, расположенной в пределах конуса выноса пра-Кубани, с целью обнаружения геоопасностей была выполнена также 2D сейморазведка. Работы выполнялись ООО «ПГС-Хазар» с применением специализированной системы сбора и регистрации сейсмической информации XZone DBS «Bottom Fish HR» производства компании «SI Technology» (Россия) и высокочастотных пневматических источников упругого сигнала BOLT 2800 LLX HR (USA). Съемка осуществлялась, в основном, по сетке профилей 2 км x 1 км.

Для отбора и изучения свойств грунтов верхней части разреза выполнялись: РСРТ (пьезо-статическое зондирование) с помощью донной рамы (sea-bed mode), глубиной до 20 м; поршневой гравитационный пробоотбор (PGC) глубиной до 20 м; вибрационный пробоотбор (VC) глубиной до 6 м; коробчатый пробоотбор (BC) глубиной до 0,5 м.

Программа лабораторных исследований в судовой лаборатории включала определения природной влажности и плотности грунта, определения сопротивления недренированному сдвигу связных грунтов с помощью лабораторной крыльчатки (miniature vane / lab-vane), микрокрыльчатки (torvane) и микропенетromетра (pocket penetrometer).



Характеристика трасс газопроводов

Выполненные изыскания выявили следующие инженерно-геологические особенности трасс газопроводов в пределах континентального склона (рис. 1).

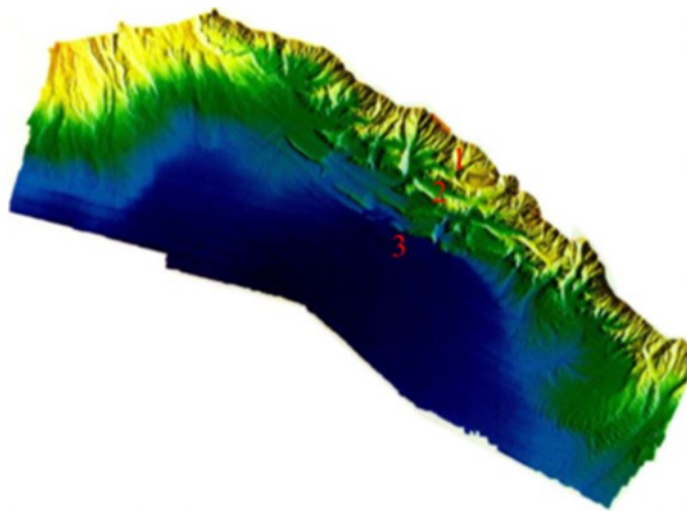


Рис. 1. Рельеф поверхности дна Восточно-Черноморской впадины по данным многолучевого эхолотирования. Цифры: 1 – континентальный склон; 2 – подножье; 3 – субабиссальная равнина (ГНЦ ФГУП «Южморгеология», 1996–1997 гг. с дополнениями)

Характеристика инженерно-геологических районов трассы газопровода «Голубой поток»

Согласно критериям инженерно-геологического районирования, континентальный склон рассматриваемого участка трассы газопровода (между изобатами 105–1900 м) выделяется в ранге области. Инженерно-геологическая область – континентальный склон характеризуется крутыми уклонами морского дна с вогнутым (отступающим) профилем. Морфология морского дна характеризуется разветвленной системой каньонов, доходящих до конца шельфа, и малых каньонов, отходящих от крупных каньонов и заканчивающихся на склоне (слепые каньоны). Максимальный уклон донной поверхности в пределах склона (в среднем на 100 м) $27,0^\circ$. Сейсмичность средней силы, $M_{\max} = 5,75$ [Лобковский, 2002], сейсмическая интенсивность (I) равна 8 баллам по шкале MSK-64 при периоде повторения (T) 475 лет. Континентальный склон, в свою очередь, подразделяется на отдельные районы (эрозионного и эрозионно-денудационного склона), в составе которых выделены подрайоны (верхней, средней и нижней его частей).

Верхняя часть континентального склона (подрайон А3). В рельефе доминируют глубокие, сильно разветвленные активные каньоны с очень крутыми боковыми стенками (уклон до 27°) и крутопадающими тальвегами, в которых могут возникнуть гравитационные потоки масс. Вершины каньонов находятся в стадии развития. В V-образной части каньонов с более крутыми стенками наблюдается регрессивная эрозия. Средняя ширина V-образных каньонов составляет 15–50 м. Средний уклон донной поверхности на отдельных участках достигает 24° . Развита ила, перекрывающие в одних местах слой тугопластичной глины с включением обломков раковин, распространенной до глубины 7 м, а в других – коренные породы (аргиллиты, алевролиты, доломиты). В среднем мощность ила составляет около 0,5–2,0 м. Ниже по склону верхний слой представлен плотной глиной мощностью $\sim 1,0$ –4,5 м, лежащей на твердой сцементированной глине. Возможны течения обломочного материала и суспензионное течение. Начало трассы расположено в пределах флексурно-разрывной зоны. Здесь отчетливо фиксируются циркуобразные сбросы. Ширина зоны активных разрывных нарушений превышает 1 км. Возможны смещения по тектоническим



нарушениям. Широко развиты оползни слабоконсолидированных осадков. Возможны оползни и обрушения илов на крутых привершинных частях склонов каньонов. Активизацию движения слабых осадков следует ожидать вблизи бровки склона, где они залегают на более твердых глинах и алевролитах. Смещение осадков будет проявляться в виде мелких оплывин с глубиной захвата грунтов не более 3–5 м. В границах средней части континентального склона (подрайон Б1) каньоны, по которым проложена трасса, расширяются вниз по склону, переходя в U-образные широкие долины с плоским дном, выполненным плотной глиной. Каньоны, вдоль которых проложены трассы, сливаются в одно русло. Уклон тальвега составляет 1° – 4° . На протяжении описываемого участка трассы морское дно усеяно многочисленными валунами и крупной галькой. В некоторых каньонах, на основании данных сейсмической съемки и батиметрии, были выявлены отложения из потоков обломков. Их мощность колеблется от 0,5 до 3,0 м. Осадки мутьевых течений (слой из обломков раковин мощностью 1 м) были выявлены на дне основного каньона (Голубого Потока (Вуланского)). На глубинах более 1000 м скорости течений в основном не превышают 5–10 см/с.

Значительные экстремумы придонной скорости были отмечены приборами, установленными на автономной буйковой станции (АБС), расположенной на материковом склоне на глубине 885 м. В течение получаса наблюдалось усиление течений до 46 см/с, что для больших глубин является исключительным событием. Это событие совпало с длительным штормом. Весьма вероятно, что усиление течений было связано со сходом плотностного потока.

Возможны течение обломочного материала и суспензионное течение как вдоль каньона, по которому проложена трасса, так и под углом в пределах устьевых частей впадающих в него боковых каньонов. В средней части континентального склона возможны смещения по тектоническим нарушениям и формирование диапировых складок. На боковых бортах каньонов, по которым проложены трассы, выявлены оползневые тела. Слабые грунты могут терять устойчивость на глубину до 3 м и 5–6 м соответственно при 475- и 10000-летней повторяемости землетрясений. Можно ожидать развитие мелких оплывин почти повсеместно на неровностях дна с крутизной более $7,1^{\circ}$ при 475-летней повторяемости землетрясений. Нижняя часть континентального склона (подрайон Б2). Долины двух каньонов, по которым проложены трассы сливаются. Ширина U-образной долины с плоским дном в этом месте превышает 1000 м. Уклоны дна не превышают $1,3^{\circ}$ – $2,4^{\circ}$. В рельефе имеется уступ, контролируемый разрывным нарушением. Поверхность дна сложена мягкопластичной глиной мощностью до 5 м, часто с прослоями ракушек и ила. Местами дно приобретает пологоволнистый характер. Длина волн порядка 50 м, высота 0,5 м. Волны сложены преимущественно обломками ракушек и песком. Возможны перемещение обломочного материала и суспензионные течения. На нижней части континентального склона отмечено разрывное нарушение, подчеркнутое в рельефе дна уступом. Осадки дна характеризуются повышенной газонасыщенностью. Возможны смещения по разрывным нарушениям, формирование диапировых складок.

Характеристика инженерно-геологических районов трассы газопровода «Южный поток»

Бровка континентального склона на трассе газопровода находится на глубинах около 100 м. Часто граница шельфа и материкового склона имеет тектоническую природу. Нижнюю границу материкового склона проводят по его перегибу, проходящему на глубине около 1500 м (углы порядка $0,1^{\circ}$ – $0,6^{\circ}$) (рис. 2).

Участок исследований (континентальный склон мористее п-ва Абрау) находится в области сочленения морского продолжения складчатых флишевых образований Северо-Западного Кавказа и мезозойско-кайнозойских слабо или недислоцированных толщ Черноморской впадины и характеризуется высокой сейсмичностью (Анапский сейсмоактивный район). Изучение палеосейсмодислокаций в зоне прибрежного Утришского разлома показало, что нижний предел магнитуды здесь $M_{\max} = 6,7$ – $6,8$



[Рогожин и др., 2014]. В нашей работе [Миронюк и др., 2021] в качестве сеймотектонической модели Черного моря была использована модель, построенная по проекту Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP). В этой модели учитывалось, что в районе Анапы (Анапский сейсмоактивный район, приуроченный к одноименному тектоническому блоку) возможны землетрясения с $M_{\max} = 6,5-7,0$. Наряду с этим на основе статистических зависимостей между объемами сейсмогравитационных оползней и магнитудами землетрясений [Агатова и др., 2008] можно сказать, что максимальный объем сместившегося оползня на участке Утришский сейсмодислокаций ($0,03 \text{ км}^3$) соотносится с сейсмическим событием с $M \approx 7,5$. Как известно, наряду с крутизной склонов, вертикальным расчленением рельефа, литологическим составом пород и др., одним из основных факторов оползнеообразования является расстояние от активных сейсмогенерирующих разломов. Согласно [Агатова и др., 2008; Палеосейсмология, 2011] уже землетрясения $M = 5,0-5,5$ могут быть причиной оползневых процессов.

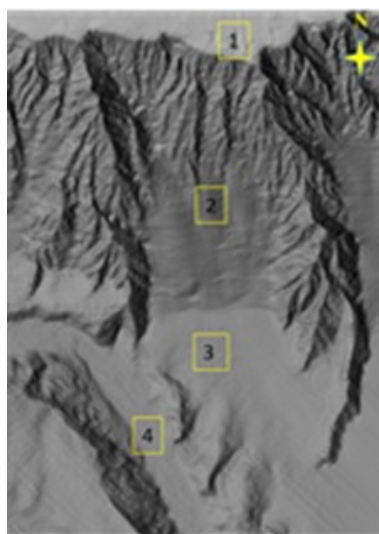


Рис. 2. Карта поверхности морского дна участка исследований. Обозначения: 1 – шельф, 2 – континентальный склон, 3 – подножье, 4 – Анапский каньон

Согласно выполненному ООО «ПитерГазИнжиниринг» (г. Геленджик) инженерно-геологическому районированию, трасса пересекает «район эрозионного склона». Этот район характеризуется большой расчленённостью рельефа дна, сложенного преимущественно скальными породами. Батиметрическая съемка, выполненная в пределах этого района, дает основание подразделить его на два подрайона: верхний в интервале глубин 110–900 м (район обнаженного коренного дна) и нижний с отметками дна 900–1500 м. Район граничит с внешней подзоной шельфа, где массивы рыхлых отложений в результате дополнительной нагрузки (например, сейсмического воздействия, шторма) могут преобразоваться в обломочные потоки [Ионов и др., 2012]. Траектории движения субаквальных селей будут приурочены к тальвегам подводных каньонов. При этом транзитными путями будут преимущественно каньоны, связанные с областью шельфа, так как максимальное количество осадочного материала будет поступать именно из этой области.

Подрайон верхней части континентального склона

Верхняя часть континентального склона крутая, сильно расчленена каньонами и характеризуется преобладанием эрозионных и обвально-оползневых процессов. В рельефе дна прослеживаются многочисленные оползневые цирки различного масштаба. Максимальные углы наклона дна в верхней части склона на отдельных участках составляют $30^{\circ}-36^{\circ}$, достигая местами почти 50° (ниже бровки шельфа), но в основном



они изменяются в пределах 14° – 18° . Коренными породами здесь служат главным образом флишевые и субфлишевые образования палеоцена, которые на крутых склонах и уступах, бортах каньонов и ложбин выходят на поверхность. Нижняя и средняя части палеоцена представлена флишевыми образованиями (мергели, алевролиты, известняки, аргиллиты, глины). Характерны скальные навесы крупных блоков известняков. Благодаря различной устойчивости указанных пород к подводному выветриванию, развитию обвально-оползневых процессов и эрозии, осуществляемой плотностными потоками, на склоне формируется резко расчлененный структурно-денудационный рельеф с грядами, сложенными коренными породами, протяженными вертикальными уступами, выступающими карнизами. Угол падения пластов коренных пород на отдельных участках склона в рассматриваемом подрайоне около 45° . Согласно видеозаписям, полученным с помощью ТНПА, коренные породы практически везде перекрыты маломощным (от 0,05 до 2,8 м) слоем связных (илы) и несвязных (песок, гравий) осадков. Доминирующими формами мезо- и микрорельефа здесь являются каньоны (в среднем шириной 100–200 м) и ложбины, скальные обрывы, ниши отрыва скальных пород, оползневые цирки. Подводными видеонаблюдениями на относительно пологих участках склона зафиксированы обвально-оползневые скопления (осыпи) и отдельные крупные глыбы (рис. 3).

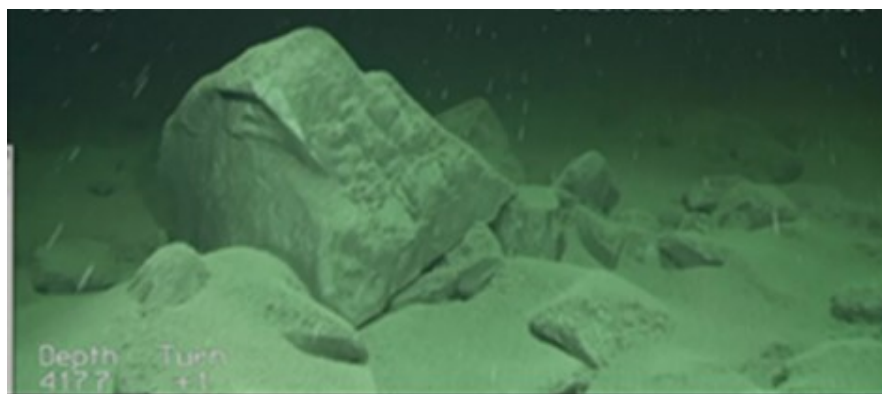


Рис. 3. Скопление обвальных масс в верхней части склона. Типичный размер глыб $2,0 \times 1,0 \times 0,5$ м [Миرونюк, 2020]

Коэффициент обвально-оползневой пораженности (K_q) равен 0,3–0,6 (сильная интенсивность проявления процессов). Одной из причин возникновения склоновых гравитационных процессов, как указано выше, являются землетрясения. Нижний предел значений магнитуды для формирования скальных оползней составляет ~ 5 , а для формирования в рыхлых грунтах $\sim 4,5$ [*Палеосейсмология, 2011*]. Траектории их движения, как правило, приурочены к тальвегам подводных каньонов. Гравитационные процессы, спровоцированные землетрясениями, происходят и в настоящее время. Свидетельство этому, зафиксированные нами подводной видеосъемкой сразу же после Су-Псехского землетрясения 10 декабря 2012 г., произошедшего в Анапском сейсмоактивном районе ($M_w = 4,3$ и $I = 5$ –6 баллов [*Габсатарова и др., 2018*]), возникшее и долго не оседавшее облако взвеси, глыбы, припорошенные тонким нефелоидным материалом. Имеются и гидрологические признаки образования плотностных потоков в рассматриваемом подрайоне. Здесь придонным измерителем, установленным на АБС, было зарегистрировано резкое усиления скорости течения – до 50 см/с. Через 20 мин скорость снизилась до 9 см/с. Течение двигалось вдоль материкового склона и принесло с собой распресненную воду с верхних горизонтов морской толщи (что было видно из данных измерений электропроводимости морской воды).

Наибольшая интенсивность склоновых процессов зафиксирована в самой верхней части склона из-за больших уклонов дна, в основном за счет смещения массивов пород, прилегающих к бровке шельфа. Поверхность склона по данным МЛЭ прорезана густой



сетью верховьев каньонов с отвершками, которые, эродируя бровку шельфа, образуют рытвины с отвесными стенками в несколько метров. Останцовые гряды между отвершками каньонов узкие, гребневидные. Ниже этого участка на ЦМР четко прослеживаются участки транзита со следами эрозии донных осадков (рис. 4), а подводными видеонаблюдениями следы обрыва кабелей (рис. 5).

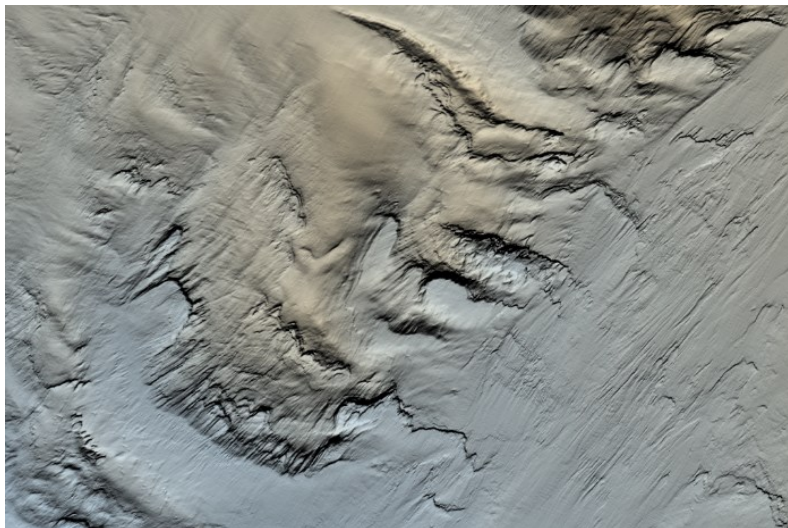


Рис. 4. Следы эродирующего воздействия на дно континентального склона обломочных потоков



Рис. 5. Обрыв кабеля в зоне транзита обломочного потока большой плотности

Подрайон нижней части континентального склона

Нижняя часть склона – более пологая и менее расчлененная (углы порядка 8° – 12°), в ее пределах начинаются процессы аккумуляции терригенного материала, выносимого гравитационными потоками по каньонам. Мощность обломочных накоплений в нижней части склона достигает 15 м. Здесь, и в пределах подножья склона под четвертичными отложениями (песками, гравийно-галечниковыми отложениями) залегают породы верхнемелового флиша, представленного грубослоистыми мергелями с прослоями кварцево-глауконитовых песчаников. Необходимо отметить, что в данном подрайоне также отмечено большое количество валунно-глыбового материала, а по данным ГЛБО на границе с подножьем прослеживается серия осадочных волн. В границах подрайона было обнаружено большое количество глыб и валунов, часто в виде нагромождения в местах слияния «питающих» каньонов.

Валуны имеют диаметр от $< 0,5$ м до > 3 м, а отдельные блоки пород достигают размеров $15 \times 5 \times 1$ м и массы 36 т. Происхождение их связывают с обрушением скальных навесов, формирующихся в верхней части склона за счет избирательной денудации, а большую дальность переноса с перемещением в теле обломочного потока благодаря эффекту гидропланирования (присутствия водного слоя под движущейся массой). Мощность обломочных накоплений в нижней части склона достигает 15 м. Для этого



подрайона характерны «глубокие» ротационные оползни слабоконсолидированных осадков и выветрелых пород. Ширина оползневых тел обычно составляет 25–50 м.

Далее материковый склон еще более выполаживается и переходит в материковое подножье – аккумулятивный шлейф, сформированный слившимися конусами выноса и шлейфами, образованными турбидитными потоками, обвалами и оползнями. Судя по мозаике ГЛБО, гравитационные отложения перекрыты маломощным слоем голоценовых илов.

Заключение

Таким образом, сравнение полученного в ходе инженерных изысканий материалов на двух трассах газопроводов показывает определенные различия в масштабах проявления гравитационных потоков наносов и в преобладающем их типе в пределах рассмотренной области морского дна. Учитывая, что региональные особенности двух участков трассы, в целом близки (находятся в районах эрозионного и эрозионно-денудационного склона) мы связываем эту разницу, прежде всего, с изменчивостью сейсмических условий вдоль основных разломно-блоковых структур Западного Кавказа, на что указывают данные Геофизической службы РАН (ГС РАН) [<http://eqru.gsras.ru/>]. Об этом свидетельствуют и материалы работ по уточнению исходной сейсмичности морских участков трасс газопроводов в пределах материкового склона выполненных ИО им. П.П. Ширшова РАН: $M_{\max} = 5,75$ (проект «Голубой поток») и $M_{\max} = 6,5-7,0$ (проект «Южный поток»). Как известно, интенсивность (энергия) землетрясений влияет на расположение, распределение и масштабы подводных оползней в морских районах. К настоящему времени получены многочисленные положительные корреляционные зависимости между моментной магнитудой землетрясения (M_w) и площадью областей, поражаемых косейсмическими оползнями, между M_w и расстоянием от эпицентра до наиболее удаленного проявления разжижения грунтов и др. [Uri et al., 2008; Палеосейсмология, 2011]. Приблизженные оценки, выполненные нами с использованием одной из указанных корреляций, показали, что при $M_w = 5,75$ площадь обрушения склона составит $\sim 2 \text{ км}^2$, а при $M_w = 7$ – от 10 до 25 км^2 . Различие проявляется и в преобладающем типе гравитационных потоков наносов формирующихся по маршрутам упомянутых газопроводов в пределах склона. Прямые и косвенные признаки свидетельствуют, что более крутые участки материкового склона Анапского п-ова с многочисленными уступами, по сравнению с таковым в районе п. Джубга, генерируют преимущественно обломочные потоки высокой плотности (подводные сели согласно взглядам А.П. Лисицына [Лисицын, 1988]).

Список литературы

- Агатова А.Р., Непоп Р.К. Новый подход к оценке палеосейсмичности и сейсмогенных изменений рельефа горных районов с использованием параметров сейсмогравитационных дислокаций (на примере юго-восточного Алтая) // Геоморфология, 2008, 4: 55–64.
- Айбулатов Н.А. Гравитационный перенос осадочного материала на континентальном склоне и безопасность строительства и эксплуатации газопровода Россия-Турция. // Обз. информ. Сер. Охрана окружающей среды и промышленная безопасность. М.: ИРЦ Газпром, 2002, 46 с.
- Габсатарова И.П., Малянова Л.С., Селиванова Е.А., Якушева В.Н. Су-Псехское землетрясение 10 декабря 2012 г. с $KP = 11.5$, $M_{\text{верг}} = 4.3$, $I_0 = 5-6$ баллов (Анапский сейсмоактивный район) // Землетрясения Северной Евразии, 2018, 21: 420–432.
- Джанджава К.И. Инженерно-геологическая оценка слабых морских грунтов как оснований подводных трубопроводов // Строительство на слабых водонасыщенных грунтах. Тез. докл. Всесоюзного науч.-технич. совещания. Одесса, 1975, с. 63–65.
- Ионов В.Ю. Опыт исследования подводных оползней для обоснования строительства морских нефтегазовых сооружений // Инженерные изыскания, 2012, 6: 52–63.
- Ионов В. Особенности развития подводных склоновых процессов // Склоновые геологические процессы. / О.В. Зеркаль, Э.В. Калинин, О.С. Барыкина и др.: коллективная монография. МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет. М.: Изд-во Перо, 2022, с. 486–512.



- Ионов В.Ю., Калинин Э.В., Фоменко И.К., Миронюк С.Г. Условия формирования подводных оползней в отложениях бровки континентального склона Чёрного моря в районе п. Архипо-Осиповка // Инженерная геология, 2012, 5: 36–46.
- Кеннетт Дж. Морская геология: в 2-х т. Т. 2. Пер. с англ. М.: Мир, 1987, 384 с.
- Лисицын А.П. Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении в морях и океанах. М.: Наука, 1988, 309 с.
- Лисицын А.П. Лавинная седиментация и развитие оползневых явлений на континентальном склоне Черного моря // Современные методы и средства океанологических исследований. Материалы VI Международной науч.-технич. конференции. Часть 1. М.: ИО РАН, 2000, с. 16–21.
- Лобковский Л.И., Гарагаш И.А. 2002. Математический анализ устойчивости Кавказского склона Черного моря и развитие оползневых процессов при землетрясениях // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2000, с. 390–402.
- Лобковский Л.И., Кузин И.П., Ковачев С.А. Детальные сейсмологические исследования с донными сейсмографами у кавказского побережья Черного моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2002, с. 373–380.
- Лонгинов В.В. Очерки литодинамики океана. М.: Наука, 1973, 244 с.
- Миронюк С.Г. Геолого-геоморфологические признаки обвалов на континентальном склоне Черного моря и оценка их опасности // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)». Том I (III). Тверь: ООО ПолиПРЕСС, 2020, с. 76–82.
- Миронюк С.Г., Ефремов Ю.В. Особенности формирования селей в бассейне р. Шахе (Северо-Западный Кавказ) и оценка возможности их трансформирования в турбидные потоки в прибрежной зоне Черного моря // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. М.: Геомакетинг, 2024, с. 338–348.
- Миронюк С.Г., Ковачев С.А., Крылов А.А. Оценка сейсмической опасности для гидротехнических сооружений в дельте реки Кубань // ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях. 2021, с. 228–231.
- Москаленко В.Н., Шимкус К.М. Оползневые образования и отложения турбидитовых потоков на кавказском материковом склоне Черного моря // Бюлл. МОИП, Отд. геологич., 2005, 80(6): 33–38.
- Мусаев В.К., Суцев С.П., Попов А.А., Федоров А.Л. Условия и причины образования оползней // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007, 4: 73–76.
- Осипов В.И. Геоэкологическая безопасность газопровода Россия-Турция (морской участок) // Материалы Международной науч.-практич. конференции (Сочи (Лазаревское), Россия, 21–24 апреля 1999 г., Москва, 1999, с. 109–111.
- Палеосейсмология / Коллектив авторов под редакцией Дж.П. Мак-Калпина. Том 1 (гл. 1–5). Пер. с англ. И.А. Басов, И.Ю. Лободенко, А.Л. Стром. М.: Научный мир, 2011, 560 с.
- Перов В.Ф. Селевые явления: Терминологический словарь. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996, 34 с.
- Перов В.Ф. Селеведение. М.: Географический факультет МГУ, 2012, 271 с.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатилов А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФ, 2014, 256 с.
- Селли Р.Ч. Древние обстановки осадконакопления. М.: Недра, 1989, 294 с.
- Серебряков А.М. «Южный поток»: новый подход к проведению экспертной оценки возможности строительства морских газопроводов // Вестник государственной экспертизы, 2020, 4: 28–36.
- Чернявский А.С. Селевой морфолитогенез на Черноморском побережье Кавказа (в пределах Краснодарского края). Дисс. на соиск. уч. степ. канд. географ. наук. 25.00.25. Краснодар, 2010, 163 с.
- Чистяков А.А., Щербаков Ф.А. Осадконакопление на подводных окраинах материков // Итоги науки и техники. Серия Общая геология. Т. 18, М.: ВИНТИ, 1984, 134 с.
- Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей. М.: Недра, 1980, 296 с.
- Шуляков Д.Ю., Чернявский А.С. Оползни и сели. Краснодар: Изд-во ООО «Просвещение-Юг», 2015, 230 с.
- Щукин И.С. Общая геоморфология. Том 3. М.: Изд-во МГУ, 1974, 383 с.
- Uri S., Lee H.J., Geist E.L., Twichell D. Assessment of tsunami hazard to the US East Coast using relationships between submarine landslides and earthquakes. // Marine Geology. 264(1–2): 65–73. doi: 10.1016/j.margeo.2008.05.011.