

DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 7th International Conference

Chengdu, China, 23–27 September 2024



Edited by
S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC
Moscow
2024

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
7-й Международной конференции

Чэнду, Китай, 23–27 сентября 2024 г.



Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева

ООО «Геомаркетинг»
Москва
2024

泥石流： 灾害、风险、预测、防治

會議記錄

第七届国际会议

中国成都, 2024年9月23日至27日



編輯者

S.S. Chernomorets, K. Hu, K. Viskhadzhieva

Geomarketing LLC

莫斯科

2024

УДК 551.311.8
ББК 26.823
С29

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). – Ed. by S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – Moscow: Geomarketing LLC. 622 p.

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2024. 622 с.

泥石流：灾害、风险、预测、防治。 會議記錄 第七届国际会议. 中国成都。 編輯者 S.S. Chernomorets, K. Hu, K.S. Viskhadzhieva. – 莫斯科: Geomarketing LLC. 622 p.

ISBN 978-5-6050369-6-8

Ответственные редакторы: С.С. Черноморец (МГУ имени М.В. Ломоносова), К. Ху (Институт горных опасностей и окружающей среды Китайской академии наук), К.С. Висхаджиева (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Edited by S.S. Chernomorets (Lomonosov Moscow State University), K. Hu (Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS), K.S. Viskhadzhieva (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).

© Селевая ассоциация

© Debris Flow Association



Особенности формирования селей в бассейне р. Шахе (Северо-Западный Кавказ) и оценка возможности их трансформации в турбидные потоки в прибрежной зоне Черного моря

С.Г. Миронюк, Ю.В. Ефремов

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

Аннотация. Морские сооружения (подводные трубопроводы, кабели связи и др.), расположенные на шельфе, особенно в мелководной его зоне, находятся в особых условиях эксплуатации. Здесь они могут быть подвержены воздействию волн, течений, а также крупных оползней и обвалов, возникающих на высоких клифах. Особенно опасны приустьевые области горных рек. В этой зоне сели, сформировавшиеся в их руслах, могут преобразоваться в турбидные потоки, способные пересечь узкие шельфы, и дальше двигаться вниз по континентальному склону к его подножью. Воздействие таких потоков может нарушить целостность подводных сооружений. Нередко возникают ситуации, когда трассу, например, морского трубопровода нельзя проложить в обход опасных участков. В таких случаях в процессе инженерно-геологических изысканий необходимо оценить вероятность воздействия турбидных потоков на сооружения и, если она высокая, разработать адекватные меры инженерной защиты объекта. Первым этапом таких исследований является анализ селевой опасности и оценка возможности трансформации селевых потоков в придонные гравитационные течения повышенной плотности. В статье представлены результаты таких исследований, выполненных в бассейне р. Шахе и на шельфе мористее ее устья. Следы прохождения небольших селевых потоков зафиксированы в некоторых притоках р. Шахе, где уклоны тальвегов водотоков достигают 15–25° и имеются селеформирующие грунты. Определены основные условия и факторы селеформирования, разновидности селеформирующих грунтов, повторяемость селевых потоков и их генетические типы, объемы единовременных выносов твердой составляющей потоков и др. Исследования на шельфе включали: многолучевое эхолотирование, гидролокацию бокового обзора, видео-и фотосъемку морского дна, отбор проб донных осадков и др. Анализ полученных данных позволил заключить, что отсутствуют признаки движения селей непосредственно в русле р. Шахе. По экспертной оценке, вероятность формирования таких селей в период эксплуатации газопровода низкая. Не обнаружены и явные следы движения турбидных потоков на шельфе.

Ключевые слова: *сель, селевая опасность, шельф, турбидные потоки, катастрофические наводки, Черноморское побережье Кавказа, долина р. Шахе*

Ссылка для цитирования: Миронюк С.Г., Ефремов Ю.В. Особенности формирования селей в бассейне р. Шахе (Северо-Западный Кавказ) и оценка возможности их трансформации в турбидные потоки в прибрежной зоне Черного моря. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 7-й Международной конференции (Чэнду, Китай). – Отв. ред. С.С. Черноморец, К. Ху, К.С. Висхаджиева. – М.: ООО «Геомаркетинг», 2024, с. 338–348.

Features of debris flows formation in the Shakhe River basin (Northwest Caucasus) and assessment of the possibility of their transformation into turbid flows in the coastal zone of the Black Sea

S.G. Mironyuk, Yu.V. Efremov

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



Abstract. Offshore structures (offshore pipelines, communication cables, etc.) located on the shelf, especially in its shallow water zone, are subject to special operating conditions. Here they can be exposed to waves, currents, as well as large landslides and rockfall that occur on high cliffs. The estuarine areas of mountain rivers are especially dangerous. In this zone, debris flows formed in their channels can transform into turbidity flows capable of crossing narrow shelves and further moving down the continental slope to its foot. The impact of such flows can compromise the integrity damage of offshore structures. Situations often arise when the route, for example, of an offshore pipeline cannot be laid to bypass dangerous areas. In such cases, in the process of engineering-geological surveys, it is necessary to assess the likelihood of the impact of turbidity flows on structures and, if it is high, to develop adequate measures for engineering protection of the facility. The first stage of such research is the analysis of debris flow hazard and assessment of the possibility of transforming debris flows into bottom gravity currents of increased density. The article presents the results of such studies carried out in the river basin Shakhe and on the shelf seaward of its mouth. Traces of small debris flows were recorded in some tributaries of the river Shakhe, where the slopes of the thalwegs of watercourses reach 15–25° and there are debris flow-forming soils. The main conditions and factors of debris flow formation, varieties of debris flow-forming soils, frequency of debris flows and their genetic types, volume of mass transport of debris flows, etc. were determined. Research on the shelf included: multi-beam echo sounding, side-scan sonar, video and photography of the seabed, bottom sampling, etc. Analysis of the data obtained allowed us to conclude that there are no signs of debris flow movement directly in the river bed Shakhe. According to expert estimates, the likelihood of such debris flows occurring during the operation of the gas pipeline is low. There are also no obvious traces of movement of turbid flows on the shelf.

Key words: *debris flow, debris flow hazard, shelf, turbidity flows, catastrophic floods, Black Sea coast of the Caucasus, Shakhe River valley*

Cite this article: Mironyuk S.G., Efremov Yu.V. Features of debris flows formation in the Shakhe River basin (Northwest Caucasus) and assessment of the possibility of their transformation into turbid flows in the coastal zone of the Black Sea. In: Chernomorets S.S., Hu K., Viskhadzhiya K.S. (eds.) Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 7th International Conference (Chengdu, China). Moscow: Geomarketing LLC, 2024, p. 338–348.

Введение

В процессе инженерных изысканий для строительства морских сооружений, в части изучения геологических и гидрометеорологических процессов, основное внимание, что закономерно, уделяется оценке опасности морских природных воздействий на проектируемые объекты [СП 504.1325800.2021, 2021]. Между тем ряд процессов, периодически возникающих в сухопутной части береговой зоны и в бассейнах рек (крупные оползни, обвалы, сели), могут также представлять угрозу для их целостности [Миронюк, 2015]. Особую категорию опасных процессов составляют турбидные потоки, возникающие в устьевых зонах крупных рек и на шельфе. Турбидные потоки – это разжиженные, состоящие из минеральных частиц, гравитационные, турбулентные придонные потоки, в которых частицы приходят во взвешенное состояние из-за турбулентности жидкости [Middleton, Hampton, 1973]. Они делятся на два основных типа: потоки высокой плотности (1500–2400 кг/м³) и потоки низкой плотности (1030–1300 кг/м³) песчано-алеврито-глинистые по составу [Перов, 2012]. Турбидные потоки, как высокой, так и низкой плотности характеризуются разбавленной массовой концентрацией ($C_m < 10 \text{ кг/м}^3$), турбулентным течением (число Рейнольдса $Re > 104$) и высокой неоднородностью взвешенных осадков [Parsons et al., 2007]. Выполненные расчеты показали, что мелкий терригенный материал, принесенный реками в береговую зону Черного моря, может перемещаться на субабиссальную равнину потоком суспензии толщиной в несколько десятков сантиметров [Есин и др., 2017].



Непосредственной причиной формирования турбидных потоков являются провоцирующие факторы (триггеры): штормовые волны, катастрофические паводки, сильные землетрясения. При действии узконаправленного потока масс в трубопроводе может возникнуть критический изгибающий момент, что может привести к нарушению общей устойчивости транспортного сооружения, истиранию наносами изоляционного покрытия труб (коррозии) и эрозии морского дна [Piper, Cochonat et al., 1999]. В случае узких шельфов (от нескольких сот метров до километров) эти потоки могут выйти за его пределы. Наиболее опасны потоки, связанные с катастрофическими, селеподобными паводками, которые выносят в море крупнообломочный материал. Мощные высокоэнергетические потоки могут формироваться даже в маловодных и пересыхающих водотоках. Существенным фактором к образованию в них селевых потоков являются морские смерчи, способные приносить огромное количество осадков с моря на сушу и «разгружать» их за короткий отрезок времени, вызывая обильные и экстремально интенсивные осадки (2 мм/мин.) [Баринов и др., 2011]. В этом случае на шельф выносятся весь накопившийся за «сухой» период материал (валуны, галька, гравий, остатки древесной растительности, часто довольно крупные). Такие процессы довольно трудно прогнозировать, так как их развитие связано с рядом различных факторов: метеоусловия; уровень воды, предшествующий повышению; количество накопившегося материала в руслах водотоков и т.п. Проявления перемещений (возможно, стоковыми течениями) донного материала (полосчатая структура изображения дна – светлые полосы, ориентированные перпендикулярно изобатам) установлены по данным сонарной съемки на траверзе рек Аше, Псезуапсе и Дагомыс (рис. 1).

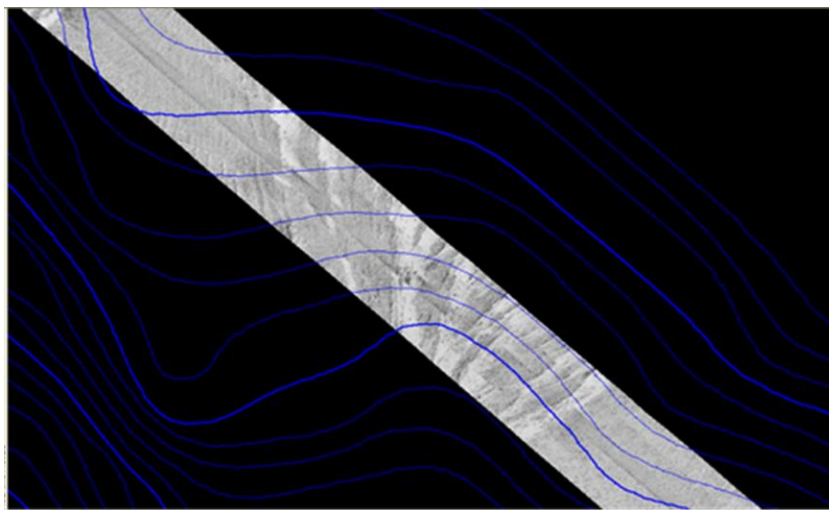


Рис. 1. Дендроидные структуры изображения дна – проявления перемещений донного материала мутьевыми потоками (линии синего цвета – изобаты). Сонарная съемка на траверзе р. Псезуапсе

Установлено, что на узких шельфах речные струи могут выходить за их пределы. Например, при паводковых условиях струи таких рек, как Чорохи, Риони, Кодори на Черном море, пересекают шельф шириной 4–5 км и проникают в зону континентального склона. Очевидно, что большие объемы твердого стока рек пересекают трассу трубопровода и на участке между устьем р. Шахе и верховьем одноименного каньона. По данным S. Jaoshvili [Jaoshvili, 2002], к головной части каньона Шахе выносятся одноименной рекой около 79 тыс. м³/год терригенного материала. Следует отметить, что в настоящее время перенос вещества поперек шельфа изучен недостаточно. Между тем, селевые потоки в долинах рек, в случае их трансформации в приустьевом взморье в мутьевые потоки, представляют опасность для сооружений, расположенных на шельфе. Оценка селевой опасности и возможности трансформации селевых потоков,



зарождающихся в бассейне упомянутой реки, в придонные узконаправленные мутьевые потоки и является целью настоящей работы.

Краткий обзор проблемы

Выбор оптимального расположения трассы подводного газопровода, других морских сооружений осуществляется по различным критериям. С одной стороны, это стоимость приведенных затрат, промышленная и экологическая безопасность сооружения, ремонтпригодность, с другой – параметры субаквальной природной обстановки и т.п. Важнейшее значение при выборе площадок (трасс) проектируемых объектов имеет корректная оценка опасности природных процессов и явлений [Миронюк, 2009]. Согласно [ВСН 51-3-85, 1985] при выборе трасс трубопроводов, участки дна моря с проявлениями, например, грязевого вулканизма рекомендовано обходить. В ряде случаев обойти участки повышенной опасности (протяженные разрывные нарушения, палеодолины, зоны значительной гидродинамической активности и т.д.) не представляется возможным. Именно такая ситуация имела место при выборе трассы газопровода «Джубга – Лазаревское – Сочи» (ДЛС). Магистральная часть трассы газопровода проходит вдоль береговой линии в благоприятной по инженерно-геологическим условиям средней части шельфа с глубинами моря от 50 до 75 м. На участке обхода каньона р. Шахе трасса с безопасного интервала глубин смещается к берегу и проходит в области глубин ~ 15–25 м в зоне активного волнового воздействия и распространения шлейфов мутных речных вод (плюмов). Отмеченная выше ситуация обусловила необходимость дополнительной оценки геологической опасности предустьевое взморья.

На начальном этапе проектирования газопровода ДЛС рассматривался наиболее опасный по последствиям гипотетический сценарий аварии, согласно которому в устьевой зоне крупной реки мощный сель трансформируется в турбидный поток. Последний, двигаясь перпендикулярно изобатам, может достичь намеченной трассы газопровода, тем самым создавая угрозу его целостности. Одним из аргументов в пользу этого «пессимистического» сценария послужило обнаружение гравийно-галечных отложений в русле каньона р. Шахе, расположенного против устья указанной реки на глубинах моря более 25 м в 1,5 км от берега и в 2,6 км от устья р. Шахе. Считается, что в условиях кавказского побережья каньоны, пересекающие материковый склон, могут служить маршрутом стока крупногалечных отложений за пределы береговой зоны [Сафьянов и др., 2001]. 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, Чернявский, 2015].

Для проверки указанного сценария были решены следующие задачи:

1. Выявлены на основе имеющихся материалов изысканий современные проявления экзогенных геологических процессов и условия их развития по трассе газопровода на шельфе и на прилегающей территории суши.
2. Рассмотрены некоторые закономерности формирования и распространения селевых потоков в бассейне р. Шахе.
3. Изучены условия, факторы и динамика литодинамических процессов в приустьевом районе р. Шахе.
4. Выполнена экспертная оценка вероятности развития турбидного потока на шельфе путем трансформации селя.

Материалы и методы

Изыскания охватывали обширную площадь, включая бассейны ряда рек (Джубга, Шахе и др.), шельф и верхнюю часть континентального склона. В процессе рекогносцировочного обследования района изысканий особое внимание уделялось выявлению селеопасных участков. Оценивались морфологические особенности территории, гидрологические характеристики и паводковый режим р. Шахе,



метеорологические условия, литодинамические процессы на участке трассы газопровода.

В основу описания субаквальной инженерно-геологической обстановки положены материалы инженерно-геологических изысканий, выполненных за период с 2002 по 2012 гг. различными организациями (ООО «Питер Газ», ООО «Сварог», ООО «ГлобалОффшорСервей», ООО «Деко-геофизика», ФГУГП «Южморгеология» и др.) по трассе газопровода «ДЛС», которые авторы настоящей работы проанализировали и обобщили с целью оценки опасности селевых и турбидных потоков для газопровода на участке его обхода верховьев каньона р. Шахе (рис. 2).

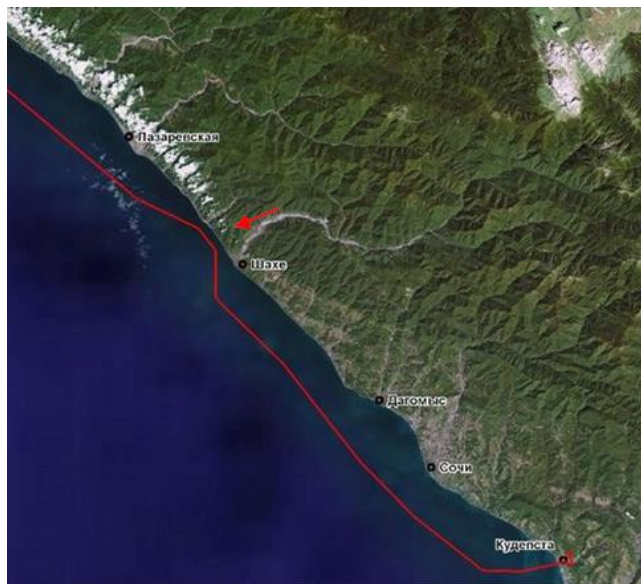


Рис. 2. Схема трассы газопровода «Дзубга-Лазаревское-Сочи» на участке его обхода верховьев каньона р. Шахе (красная стрелка)

Материал, характеризующий морские инженерно-геологические условия участка, был получен в ходе инженерно-геофизических исследований и отбора образцов грунтов пробоотборниками для последующего изучения их состава и свойств. Геофизические исследования включали промеры глубин эхолотом, многолучевое эхолотирование, обследование морского дна гидролокатором бокового обзора (ГЛБО). Осмотр морского дна осуществлялся также с помощью водолазов и телеуправляемыми необитаемыми подводными аппаратами (ТНПА). Для изучения дна и верхней части грунтового массива, геологических процессов применялись также акустическое и непрерывное сейсмоакустическое профилирование (АПр, НСП). Батиметрические измерения выполнялись с помощью однолучевых промерных эхолотов ПЭЛ-Д, Odom Echo Track МК III, а также двухчастотного эхолота «ST60 Depth». Многолучевое эхолотирование осуществлялось посредством аппаратов Kongsberg EM3002, а ГЛБО «Гидра-2», Klein 3000, «Катран-Д», «Benthos SIS 1624», «С-Мах». На участке обхода верховьев каньона р. Шахе (рис. 2) детальная площадная съемка рельефа выполнялась в масштабе 1:1000 с использованием многолучевого эхолота «Reson Sea Bat 7125» на частоте 400 кГц, что обеспечивало регистрацию всех глубин в районе работ.

Видео- и фотосъемка морского дна проводилась ТНПА «SUB-fighter 7500», «SUB-fighter 15K», «Falcon». АПр для изучения верхней части разреза на глубину (по грунту) до 20 м и НСП проведены соответственно профилографом АП-4 разработки НИПИОкеангеофизика, параметрическим профилографом SES 2000 Medium и одновременным профилированием двумя системами – «Benthos Chirp II» и электроискровым излучателем тип «Спаркер» (ООО «Питер Газ»). Пробоотбор до глубины 21 м выполнялся с помощью забортной гидроударной установки УГВП-130/4 с



НИС «Диорит» и ударной прямооточной трубкой. На участках развития песчаных (и более грубозернистых) грунтов использовался дночерпатель «Океан-0,25».

Результаты

Согласно [Руководство по изучению селевых потоков, 1976] к селеопасным бассейнам принято относить бассейны малых горных рек и ручьев со значительными уклонами тальвегов (более 3°) и достаточным количеством готового к перемещению рыхлообломочного материала, образованию которого способствуют процессы физического выветривания и водноэрозионная деятельность на водосборе. Эрозионно-транспортный селевой процесс возникает при уклонах свыше ~ 6°. Причем до 17° – это еще наносоводный селевой поток, срывающий русловую самоотмостку и переносящий большое количество взвешенных и влекомых наносов за счет своей транспортирующей способности. При уклонах более 17° начинается сдвиговой селевой процесс, формируется грязевой (плотность около 2000 кг/м³) или грязекаменный селевой поток (плотность более 2000 кг/м³). Известны случаи прохождения антропогенных селевых потоков наносоводного типа в районе г. Новороссийска. Формирование их связано с неупорядоченным сбросом отвалов скальных грунтов при производстве строительных работ и разработке карьеров.

Региональные оценки селевой опасности

Региональные оценки селевой опасности в селевом районе Большого Сочи (южный склон Северо-Западного Кавказа, бассейны рек Мзымта, Шахе, Псоу и др.) дали следующие результаты: показатель пораженности территории (%) <5; максимальный объем выносов <50 тыс. м³; степень селевой опасности – низкая [Чернявский, 2010; Шуляков, Чернявский, 2015]. Согласно В.Ф. Перову, категория селевой опасности в рассматриваемом районе – очень низкая. Максимальный объем единовременных выносов менее 10 тыс. м³ [Опасность селей, 2007].

Условия развития и проявления селевого процесса в бассейне р. Шахе

Долина р. Шахе широко разработана русловыми процессами (рис. 3). Склоны покрыты густой лесной растительностью, что весьма ограничивает возможности накопления обломочного материала в потенциальных селевых очагах верховий притоков реки.



Рис. 3. Долина р. Шахе в среднем течении



Результаты полевых исследований в бассейне р. Шахе в верхнем и среднем ее течениях дали возможность оценить масштаб селепроявления, выявить условия формирования селей, установить характеристики прошедших селей и т. д. [Ефремов, 2012].

Река Шахе – вторая по длине река Черноморского побережья в пределах Краснодарского края. Она берет начало на склонах г. Малая Чира (2218 м), протекает по Лазаревскому району города Сочи, собирает воды с бассейна площадью 562 км². Длина реки 59 км, общее падение 1620 м, средний уклон 15,3°. Средняя высота водосбора 1010 м. Средняя высота бассейна 854 м, максимальная ширина 46 км, средняя ширина 12 км. Почти весь бассейн реки горный и покрыт лесом [Герашенко, 2017].

Река принимает многочисленные притоки, среди которых наиболее крупные Ажу, Бзыч, Бзуху и др. По некоторым из них периодически сходят селевые потоки на дорогу между с. Солох Аул и кордоном Бабул Аул. По данным Отдела высокогорных исследований СК УГМС, в бассейне р. Шахе в пределах рассматриваемой дороги выявлено 7 селеактивных русел, по которым регулярно сходят селевые потоки [Заруднев и др., 2007]. Небольшие селевые потоки (микросели) проходили по боковым селеопасным оврагам на левом приустьевом склоне долины, где уклоны тальвегов водотоков достигают 15–25°. Селевые явления отмечались в июле 1949 г., августе 1960 г., июне 1965 г., июне 1966 г., августе 1969 г., декабре 1971 г., сентябре 1972 г. Так, например, 4 августа 1969 г. микросель повредил сады и огороды в п. Малый Кичман в 6 км от моря.

По генезису здесь преобладают дождевые селевые потоки. По составу твердой составляющей это грязевые сели (около 40%), остальные – грязекаменные (60%). Объемы единовременных выносов твердой составляющей колеблются от сотен м³ до нескольких тысяч м³. Повторяемость прохождения селевых потоков также колеблется в широком диапазоне от одного раза в год и до одного раза в 10 лет. Средняя длина селевых русел от 0,5 до 1,5 км. Средняя площадь селевых бассейнов составляет 0,2–10 км².

Источником твердой составляющей являются рыхлые отложения – продукты физического выветривания, размыва русел малых рек. Это гравитационные, элювиально-делювиальные и аллювиальные образований, разнообразные по составу и мощности. На мел-палеогеновом флишевом субстрате склоновые отложения представлены грубообломочным глинисто-щебенистым материалом мощностью 0,5–5 м. На песчано-глинистых отложениях состав их суглинисто-глинистый с небольшим содержанием обломков, мощность их здесь достигает 15–20 м и более. У многих рек, особенно в верхнем течении, долины имеют денудационные воронки, в которых скапливается рыхлый материал – основной источник твердой составляющей селевых потоков. В составе аллювия р. Шахе преобладает галечный материал. Наиболее крупные фракции (валуны до 30–40 см) аккумулируются в предгорной зоне, по мере приближения к устью средний диаметр крупнообломочных грунтов уменьшается до 10–12 см. Такое распределение наносов связано с падением скорости течения речного потока.

Морфологические особенности рельефа рассматриваемой территории создают благоприятные условия для возникновения селевых потоков. Здесь селесборами служат водосборы мелких и средних водотоков, временных и постоянных, площадью от 1–2 до 100–200 км² и характерным уклоном русла ~ 6°–17°.

Гидрологические условия в бассейне оказывают преобладающее влияние на процессы формирования селей. Притоки р. Шахе отличаются большими уклонами и часто имеют вид горных ручьев, каскадами ниспадающих с гор. Режим реки характеризуется паводками, наблюдающимися в течение всего года, отчасти слабо выраженным весенним половодьем с марта по июнь, а также более или менее устойчивыми низкими уровнями, имеющими место обычно летом, между июнем и сентябрем. Половодье часто (3–6 раз) нарушается дождевыми паводками. Максимум уровня весеннего половодья наблюдается обычно в мае–июне и составляет 0,6–1,2 м. Количество паводков колеблется от 2 до 23 (в год), продолжительность их 2–3 дня, реже до 10–15 дней. Средняя высота – 0,5–0,9 м, максимальная (1,4–2 м) наблюдается большей



частью в июне. В межпаводковые периоды амплитуда колебаний уровня воды не превышает 0,05–0,1 м. Отдельные резкие подъемы, вызванные дождями, иногда достигают высоты 0,6–0,9 м, а в некоторые годы даже 1,7 м. В питании реки участвуют снеговые, дождевые и грунтовые воды. Быстрое таяние снега в бассейне, совпадающее с выпадением большого количества осадков, обуславливает высокий сток с марта по май. В течение этого периода река сбрасывает около 40–45% годового стока. В остальные сезоны сток распределяется более или менее равномерно. Низкий сток (4–12%) наблюдается в период с июля по сентябрь [*Ресурсы поверхностных вод СССР, 1974*].

Средний расход взвешенных наносов реки равен 7,4 кг/с, а средняя наибольшая мутность 5230 г/м³. Наибольший расход взвешенных наносов наблюдается в мае и июне, когда в смыве почв принимают участие талые и дождевые воды, а также в августе при сильных дождях после продолжительной засухи.

Наблюдения последних лет показали, что структура твердого стока подвержена значительным колебаниям сезонного и многолетнего характера. Так, на р. Шахе соотношение наибольшего и наименьшего годового стока достигает 55.

Атмосферные осадки при благоприятных геоморфологических условиях являются основной причиной схода селевых потоков. В изученном районе годовая сумма осадков составляет в Бабук Ауле 2267 мм, а в Солох Ауле 2456 мм.

Проведенные рекогносцировочные исследования в долине р. Шахе по дороге Солох Аул – Бабук Аул показали значительную селевую опасность. Было зарегистрировано около десятка селей различного объема. По всей вероятности, все зарегистрированные селевые потоки сформировались во время интенсивных атмосферных осадков.

Для оценки потенциальной селевой опасности в нижнем течении и приустьевой зоне р. Шахе были собраны и проанализированы соответствующие материалы по малым рекам Черноморского побережья Кавказа, впадающим в Черное море. Сели и селеподобные паводки при интенсивных дождях, завершающихся ливнями, могут формироваться по следующим водотокам: р. Псебе, р. Аше, р. Туапсе и др. Анализ отдельных случаев появления селей на Северо-Западном Кавказе позволяет отметить, что наиболее селеопасными были влажные годы с обеспеченностью годового количества осадков 10% и менее [*Кононова, Мальнева, 2004*]. В эти годы наблюдалось максимальное число дней с обильными осадками. Установленная закономерность характерна как для среднегорных и высокогорных районов, так и для низкогорных районов приморья. Для всей исследуемой территории с малыми площадями водосборов селевых водотоков, при условии преобладания в селевых очагах мел-палеогенового флиша и продуктов его выветривания, из всех прочих условий формирования селей наибольшее значение имеют экстремальные суточные осадки. Селевая опасность возникает при суточных осадках 100 мм и более [*Природные опасности России, 2002*]. Подобная ситуация отмечалась в селеопасных 1942, 1949, 1960, 1964 гг. Столь высокая интенсивность осадков бывает достаточно редко. Например, за 11-летний период (1991–2001 гг.) по метеорологической станции Туапсе отмечено всего 4 таких случая: в один из дней июня 1996 г. выпало 118 мм осадков; 1 марта 1996г. – 147 мм; 10 января 1998г. – 123,6 мм; 10 ноября 2000 г. – 153,8 мм.

Особенности литодинамики на предустьевом взморье р. Шахе

В качестве основных возможных источников геологической опасности для газопровода в пределах авандельты (приустьевого взморья) можно рассматривать стоковые течения в периоды паводков, штормовое воздействие волн на дно и оползневые процессы.

Проведенные изыскания показывают, что изменения рельефа дна стоковыми течениями на приустьевом взморье ограничиваются изобатой 5–7 м (400–500 м от береговой черты). Совмещение участков батиметрической съемки, выполненной с помощью многолучевого эхолотирования в 2008 и 2011 гг., показало, что в пределах авандельты р. Шахе в приблизительно указанном интервале глубин моря в 2011 г. имел



место размыв дна, о чем свидетельствует понижение отметок дна моря на некоторых площадях по сравнению с 2008 г. на 0,4–0,6 м. Зафиксировано также в отдельных местах приустьевом взморья реки повышение отметок дна за счет аккумуляции речных наносов. Относительные превышения по сравнению с 2008 г. составляет 0,5–0,8 м. По данным исследований рельефа р. Шахе, выполненных ранее [Пешков, 2005], после прохождения крупного паводка на приустьевом взморье отмечалось понижение отметок дна в устьевом створе до 2,6 м (в среднем 1,5 м). Мористый склон устьевого бара выдвинулся на глубину около 7 м. Мощность отложившегося в период паводка слоя наносов на баре составила 3,5 м при средней в 2,3 м; объем – 140 тыс. м³. Для цели настоящей статьи особый интерес представляет дальность выноса материала песчано-алевритовой фракции. Проведенные приближенные оценки показали, что для диапазона высоких значений скоростей речной струи, характерных для паводковых ситуаций ($v_0 > 1,5$ м/с), песчано-алевритовый материал, обогащенный автохтонным раковинным материалом, может выноситься на расстояния до 1,5–2,0 км от устьевого створа до глубины 15–20 м (рис. 4).



Рис. 4. Литодинамические проявления в пределах авандельты р. Шахе: аккумуляция песчано-алевритового материала выноса р. Шахе.

С глубин около 20 м в составе современных осадков постепенно повышается роль пелитового материала [Подводные каньоны Мзымты и Шахе, 2018]. Взаимодействие вод реки и моря при их непосредственном контакте приводит к замедлению струйного речного течения и, как следствие, к отложению в первую очередь крупнообломочной составляющей речных наносов, формированию специфических устьевых форм рельефа дна.

Выводы

Рассмотренный сценарий возможной аварийной ситуации на траверсе Шахе, обусловленной воздействием на сооружение мутьевого потока высокой плотности, экспертно оценивается как имеющий крайне низкую вероятность. По данным выполненных изысканий, выносимый рекой крупнообломочный материал почти полностью задерживается в пляжевой зоне или в верхней части подводного склона. В верхней части разреза в пределах коридора трассы газопровода (глубина моря 15 м и более) развиты илы с ракушечным детритом, супеси, реже пески мелкие и пылеватые. Отсутствуют также здесь и характерные формы гравитационного переноса осадков, которые уверенно идентифицируются на сонограммах. Они проявляются появлением дендровидных, полосчатых структур – протягивающихся в крест направления изобат полос, с низкоамплитудной записью, приуроченных к локальным понижениям рельефа морского дна (эрозионным ложбинам) и сливающихся в направлении к бровке шельфа.



Что касается найденных гравийно-галечниковых отложений в русле подводного каньона р. Шахе, то не исключено, что это отложения новозвксинской регрессии Черного моря, когда ее уровень понижался, по разным оценкам, на 42–120 м. Ввиду слабой изученности механизмов трансформации селевых потоков в мутьевые, потенциально опасные области современного шельфа требуют особого внимания при проектировании и строительстве подводных сооружений.

Список литературы

- Баринов А. Ю., Аш Е. В., Чистов С. В. Геолого-геоморфологические и климатические условия формирования селевых потоков на прибрежных территориях России // ГеоРиск. 2011. № 4. С. 28–32.
- ВСН 51-3-85. Проектирование промысловых стальных трубопроводов. М.: 1985. 28 с.
- Герашенко И. Н. Гидролого-гидрографическая характеристика некоторых бассейнов рек влажных субтропиков Причерноморья Краснодарского края // Символ науки. 2017. Т. 3. №. 3. С. 230–232.
- Есин Н.В., Мурдмаа И.О., Есин Н.И., Мельникова И.В. Медленное течение потоков суспензии на абиссальной равнине Черного моря// Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. М.: ИО РАН, 2017. С. 59–61.
- Ефремов Ю. В. Селевые процессы и явления в бассейне р. Шахе (Северо-Западный Кавказ) // Двадцать седьмое пленарное межвузовское координационное совещание по проблеме эрозийных, русловых и устьевых процессов. 2012. С. 114–116.
- Заруднев В.М., Салпагаров А.Д., Хома И.И. Лавинно-селевая опасность бассейнов рек Теберда, Большой Зеленчук, Мзымта и защита от снежных лавин и селей горнолыжных комплексов Домбай, Архыз, Красная Поляна // Труды Тебердинского государственного заповедника. Кисловодск: Северо-Кавказское издательство «МИЛ», 2007. Вып. 46. 287 с.
- Кононова Н.К., Мальнева И.В. Вероятность повторения на Северном Кавказе природных катастроф 2002 г. Устойчивое развитие горных территорий: проблемы и перспективы интеграции науки и образования. 21–23 сентября 2004 г. // Владикавказ. 2004. С. 214–219.
- Миронюк С. Г. Геологические опасности дна восточной части Черного моря и их учет при выборе трасс подводных газопроводов // Геология, география и экология океана: Материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Д.Г. Панова (8–11 июня 2009 г., г. Ростов-на-Дону). Ростов – на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН. 2009. С. 230–233.
- Миронюк С. Г. Анализ геологических опасностей и рисков при строительстве морских трубопроводов и подводных добычных комплексов // Инженерная защита. 2015. № 11. С. 30–39.
- Перов В. Ф. Селеведение. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 272 с.
- Пешков В.М. Галечные пляжи неприливых морей. Краснодар, 2005. 444 с.
- Опасность селей. 1: 3 000 000. Автор: В. Ф. Перов // Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. РФ. Южный федеральный округ. М.: Дизайн. Информация. Картография. 2007. С. 94–95.
- Подводные каньоны Мзымты и Шахе: морфология, литодинамические процессы// Система Черного моря / Глазырин Е. А., Мараев В. Л. М.: Научный мир. 2018. С. 84–105.
- Природные опасности России. Том. 3. Экзогенные геологические опасности. Под ред. В.М. Кутепова, А. И. Шеко // КРУК. Москва. 2002. 345 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 9. Закавказье и Дагестан. Вып. 1. Западное Закавказье (Гидрографические описания рек, озер и водохранилищ). Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 578 с.
- Руководство по изучению селевых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 144 с.
- Сафьянов Г. А., Меньшиков В. Л., Пешков В. М. Подводные каньоны–их динамика и взаимодействие с береговой зоной океана. М.: Изд-во ВНИРО. 2001. 197 с.
- СП 504.1325800.2021. Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования. М.: Минстрой России. 2021. 168 с.
- Чернявский А.С. Селевой морфолитогенез на Черноморском побережье Кавказа (в пределах Краснодарского края). Автореф. канд. географ. наук. Краснодар. 2010. 24 с.
- Шуляков Д. Ю., Чернявский А. С. Оползни и сели. Краснодар: Просвещение-Юг. 2015. 230 с.
- Jaoshvili S. The rivers of the Black Sea. Technical Report, № 71. European Environment Agency, 2002. 58 p.



- Middleton, G.V., and M.A. Hampton, 1973, Sediment gravity flows: Mechanics of flow and deposition, in G.V. Middleton, and A.H. Bouma, eds., *Turbidites and Deep-Water Sedimentation: Pacific section* SEPM, Los Angeles, California, p. 1–38.
- Parsons, J. D., Friedrichs, C.T., Trykovski, P., Mohrig, D., Imran, J., Syvitski, J. P. M., Parker, G., Puig, P., and Garcia, M. H. 2007. The mechanics of marine sediment gravity flows. *Continental Margin Sedimentation: Transport to Sequence*. IAS Special Publication 37, Blackwell Publishing Ltd, Oxford (C. Nittrouer Editor). P. 275–338.
- Piper D. J. W., Cochonat P., Morrison M. L. The sequence of events around the epicentre of the 1929 Grand Banks earthquake: initiation of debris flows and turbidity current inferred from sidescan sonar // *Sedimentology*. 1999. Vol. 46. №. 1. P. 79–97.