

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЧЕРНОМОРСКОЙ ВПАДИНЕ

А.Г. Росляков¹, А.В. Старовойтов², С.М. Клещин

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра нефтегазовой седиментологии и морской геологии. 119213, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1; e-mail: aros160@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики. 119213, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1; e-mail: starovoytov_msu@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты изучения гравитационных процессов в Черноморской впадине по данным мультиточастотного сейсмоакустического профилирования, гидролокации бокового обзора и многолучевого эхолотирования. Рассмотрены примеры проявления на сейсмоакустических разрезах отложений подводных оползней и гравитационных потоков. Особое внимание уделено интерпретации данных, полученных с использованием автономного необитаемого подводного аппарата в глубоководной зоне моря.

Ключевые слова. Оползень, обломочный поток, профилограф, континентальный склон.

GRAVITY PROCESSES IN THE BLACK SEA DEPRESSION

A.G. Roslyakov¹, A.V. Starovoytov², S.M. Kleshchin

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Petroleum Sedimentology and Marine Geology. 1, Leninskiye gory, Moscow, Russia, 119213; e-mail: aros160@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Seismometry and Geoacoustics. 1, Leninskiye gory, Moscow, Russia, 119213; e-mail: starovoytov_msu@mail.ru

Abstract. The results of studying gravity processes in the Black Sea basin based on data from multi-frequency continuous seismic profiling, side-scan sonar, and echo sounding are presented. Examples of the occurrence of underwater landslides and gravity flows on seismic acoustic sections of sediments are considered. Special attention is paid to the interpretation of data obtained using an autonomous uninhabited underwater vehicle in the deep-sea zone.

Key words. Landslide, debris flow, sub bottom profiler, continental slope.

Введение

Среди опасных геологических процессов на акваториях, которые могут оказать негативное воздействие на возводимые или уже существующие сооружения, одними из основных являются гравитационные (оползневые) процессы. Они наблюдаются во всех морфологических зонах морских бассейнов и могут затрагивать отложения на значительном удалении от материкового подножия. Расстояния, на которые перемещаются осадки, достигают многих сотен километров (в редких случаях до 1500 км), скорость распространения некоторых видов потоков – до 120 км/ч. Площадь, перекрываемая оползневыми толщами, может достигать несколько сотен квадратных километров, а объем перемещенных отложений – более 500 км³ [Богоявленский и др., 2020; Старовойтов и др., 2022; Dingle, 1980]. Опубликованные данные показывают значительную роль гравитационных процессов в осадконакоплении, особенно на континентальных окраинах. Нередко их проявление приводит к масштабным катастрофам: разрыву кабелей и трубопроводов, опрокидыванию буровых платформ, цунами и т.д. [Богоявленский и др., 2020]. Изучение этих процессов в Черноморской котловине имеет большое значение по двум причинам. Во-первых, по дну моря на континентальном склоне, его подножии и в самой глубоководной котловине проложено несколько трубопроводов, для которых оползневые процессы представляют геологическую опасность высокой степени риска. Во-вторых, в Черноморской впадине имеется большое разнообразие участков с различной морфологией континентальной окраины

(узкие и широкие шельфы, континентальные склоны с различными углами наклона морского дна, подводные конусы выноса), что позволяет ожидать также и большое разнообразие гравитационных процессов.

На акватории Черного моря эти процессы изучались многими исследователями [Архангельский, 1930; Ионов и др., 2012; Росляков и др., 2021; Старовойтов, 1985; Шимкус и др., 2002; Dingle, 1980]. Особо следует отметить работу А.Д. Архангельского [Архангельский, 1930], в которой по материалам всего нескольких грунтовых колонок на материковом склоне Черного моря он наметил основные направления изучения гравитационных процессов. Дальнейшее развитие морских исследований, в первую очередь широкое использование сейсмических методов, показало правильность его предположений.

Накопленный к настоящему времени мировой опыт изучения подводных гравитационных процессов свидетельствует, что оползни различного генезиса происходят при углах наклона дна уже в первые градусы и могут наблюдаться даже при уклонах менее 1° (рис. 1, цитируется по [Shanmugam, 2015]). Таким образом, они могут происходить в пределах всех морфологических зон акваторий.

Анализ имеющихся данных по акваториям показал, что основными причинами оползания осадков, т.е. спусковыми механизмами, являются следующие: землетрясения, увеличение углов наклона морского дна на материковых склонах в связи с прогибанием дна осадочного бассейна, большие скорости осадконакопления, подвижки по разломам, штормовое воздействие [Старовойтов и др., 2022].

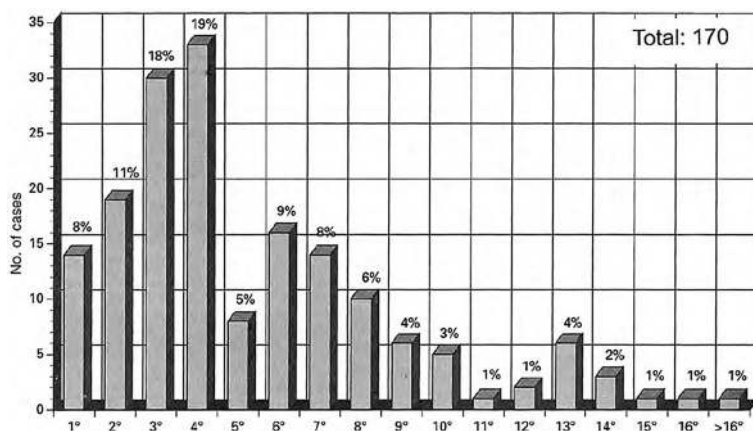


Рис. 1. Гистограмма, показывающая частоту распределения подводных оползней на Атлантической материковой окраине США при различных углах наклона поверхности дна

По горизонтали – углы наклона дна, по вертикали – количество оползаний в процентах

Целью настоящей работы является выявление различных типов гравитационных процессов и сформированных ими геологических тел по данным мультичастотных сейсмических и гидроакустических исследований в Черноморской впадине. Рассматриваются районы шельфа, материкового склона, его подножия и глубоководной котловины.

На сейсмических данных подводные оползни и потоки идентифицируются по хаотической или акустически прозрачной волновой картине (хотя могут встречаться отдельные участки с относительно протяженными отражающими горизонтами), а также по таким признакам, как выпуклая вверх, часто бугристая поверхность кровли, эрозионный характер подошвы, наличие поверхности скольжения и стенки отрыва. По данным гидролокации бокового обзора (ГЛБО) и многолучевого эхолотирования (МЛЭ), для отложений гравитационного генезиса характерны резкие перепады рельефа дна, обрывы, уступы, бугристо-западинный микрорельеф.

На акватории Черноморского бассейна в изучении оползневых процессов сейсмическими и гидролокационными методами можно выделить два основных этапа. На первом этапе, продолжавшемся практически до начала XXI века, сейсмические исследования были нацелены преимущественно на изучение глубинной структуры Черноморской впадины и носили региональный характер [Туголесов и др., 1985; Шимкус и др., 2002].

Эти исследования проводились по методике МОВ ОГТ, и их ограниченная разрешающая способность не позволяла детально изучать самую верхнюю часть разреза – до 100 м от дна. В какой-то мере этот интервал был освещен непрерывным сейсмоакустическим профилированием (НСАП), однако и эти работы имели существенные ограничения по разрешающей способности и детальности, поскольку проводились преимущественно с электроискровыми источниками с относительно невысокой центральной частотой. Большой объем данных НСАП был получен в ходе научных экспедиций лаборатории сейсмоакустики и лаборатории морской геологии геологического факультета МГУ [Старовойтов и др., 1984; Старовойтов, 1985].

В ряду наиболее значимых исследований, выполненных на этом этапе, необходимо отметить начатые в 1991 году площадные работы ГНЦ «Южморгеоло-

гия» по геологической съемке масштаба 1:200 000 на шельфе и континентальном склоне на участке Анапа – Адлер, а также исследования в рамках проекта ЮНЕСКО «Плавучий университет» под руководством М.К. Иванова (МГУ имени М.В. Ломоносова).

Началом второго этапа можно считать стартовавшие примерно на рубеже XX и XXI веков работы по созданию подводных газотранспортных коридоров из России в Турцию – трубопроводов «Голубой поток» (1998–2000) и «Южный поток» (2009–2012). Работа по прокладке трубопроводов потребовала проведения детальных исследований рельефа морского дна и приповерхностной части разреза с целью выявления и картирования опасных геологических процессов и явлений (ОГПЯ), среди которых подводные оползневые процессы занимают важнейшее место. Особенно это относится к районам с повышенной сейсмичностью, к которым принадлежат обширные области континентального склона и шельфа Черного моря. В ходе инженерно-геологических изысканий, проведенных в рамках указанных проектов, впервые были выполнены непрерывные сейсмоакустические и гидролокационные наблюдения вдоль столь протяженных трасс этих крупнейших трубопроводов, пересекающих все структурно-тектонические зоны и геоморфологические элементы Черноморской впадины. Необходимо отметить, что трубопровод «Южный поток» после изменения положения трассы на заключительном этапе получил название «Турецкий поток», однако исследования были проведены вдоль всего изначально запланированного коридора с прежним названием и выходом на берег Болгарии. В ряду подобных линейных сооружений, хотя и меньшего масштаба, необходимо отметить и введенный в эксплуатацию в 2011 году газопровод Джубга – Лазаревское – Сочи, примерно 90% трассы которого проходит по дну Черного моря.

Кроме того, в начале 2000-х годов компанией ПАО «НК «Роснефть» при проектировании строительства подводно-добычных комплексов проводились инженерно-геологические изыскания на лицензионных участках (ЛУ) «Туапсинский прогиб» (2008), «Западно-Черноморская площадь» (2013), «Южно-Черноморская площадь» (2016). В ходе этих работ в ряду прочих геологических опасностей также были выявлены и окартены элементы с признаками гравитационной неустойчивости донных отложений.

Исследования на всех перечисленных объектах проводились с использованием современных высокоразрешающих модификаций сейсмоакустического профилирования и многолучевого эхолотирования, что позволило существенно расширить представления о строении самой верхней части разреза, в том числе о типах гравитационных процессов и их масштабах в Черноморской котловине, особенно в позднем плейстоцене–голоцене.

Из региональных работ МОГТ, выполненных на втором этапе, отметим исследования, проведенные в 2011 году по международному проекту «Геология без границ».

Результаты исследований гравитационных процессов на первом этапе

На начальном (первом) этапе для изучения верхней части разреза использовались относительно низкочастотные варианты непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП) с центральной частотой 75–400 Гц и вертикальной разрешающей способностью в первые метры. Детальность, как правило, не превышала 35–40 точек на 1 пог. км профиля, а глубинность по грунту составляла до нескольких сотен метров.

На этом этапе исследований были изучены наиболее выраженные в рельефе дна и в структуре верхней части разреза оползневые тела на континентальном склоне Западно-Черноморской впадины и прикромской части моря [Старовойтов и др., 1984; Старовойтов, 1985]. Кроме того, был обнаружен гигантский оползень на объединенном конусе выноса палео-Дона и палео-Кубани в диапазоне глубин от 1950 до 2050 м. Объем этого самого крупного и известного оползня в Черном море составляет 40 км³, площадь 200 км² и дальность выброса 22 км.

Ниже приводятся примеры выявления гравитационных отложений по данным НСАП, полученные на первом этапе. На рис. 2 представлен фрагмент профиля НСАП, который протягивается вдоль изобат на материковом склоне в западной части Черноморской впадины (Болгарский сектор) на глубинах 200–400 м, т.е. в верхней части континентального склона. На горизонтально залегающих слоистых осадках, кровля которых показана на рисунке красной стрелкой, залегает толща мощностью около 150–200 м (здесь и далее при пересчете из временного в глубинный масштаб использовалась скорость 1800 м/с), в которой наблюдается деформация отложений, причем степень деформации возрастает снизу вверх, т.е. при приближении к дну (рис. 2). Аналогичное строение наблюдается на всем протяжении профиля (около 150 км) вдоль материкового склона западной части Черноморской впадины [Старовойтов, 1985]. Подобные деформации обусловлены, очевидно, оползанием верхней толщи. Многочисленные «долины», которые наблюдаются на профиле, являются не эрозионными, а обусловлены неравномерным оползанием и деформацией осадков. Возможной причиной этого масштабного движения отложений, вероятно, является значительная скорость прогибания Западно-Черноморской впадины в плиоцен-четвертичное время, что привело к увеличению наклона дна на материковом склоне и неустойчивости верхней части осадочного чехла.

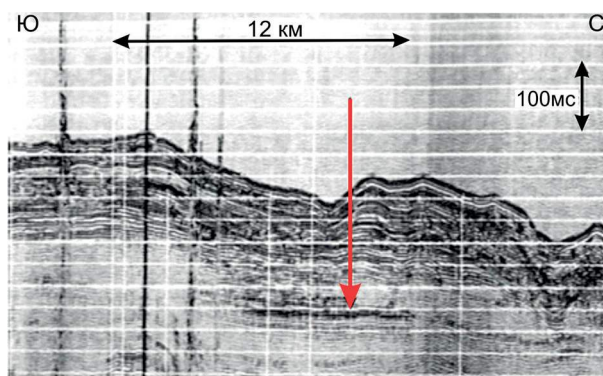


Рис. 2. Фрагмент профиля НСАП, расположенного вдоль изобат на материковом склоне в западной части Черноморской впадины (красная стрелка указывает на кровлю горизонтально-слоистой толщи в центральной части фрагмента)

В юго-западной части Черного моря на профиле НСАП (рис. 3) внутри наклонно-слоистой толщи плиоценового (?) возраста выделяются два сейсмокомплекса (СК) с хаотической волновой картиной (указаны красными стрелками на рис. 3). Подошва нижнего из этих комплексов ровная, наклонена, как и все выше- и нижезалегающие отражающие границы под углом около 3° в сторону глубоководной части впадины. Анализируя внутреннюю структуру этого СК, следует отметить, что при приближении к его кровле начинают появляться все более протяженные оси синфазности слабоизогнутой и даже прямолинейной формы, т.е. максимальные деформации наблюдаются в основании комплекса. Кроме того, признаки слоистости появляются во внешней его зоне, вблизи континентального склона. Мощность комплекса составляет 25–30 м, в пределах данного профиля он протягивается на расстояние около 5 км. Его кровля, в отличие от подошвы, имеет неровную, волнистую форму, причем волнистость отмечается и в перекрывающих отложениях, но она постепенно затухает вверх по разрезу. Это может свидетельствовать как о покровно-облегающем характере вышезалегающих отложений с постепенным сглаживанием неровностей, так и о вовлечении этих вышезалегающих отложений в общий процесс оползания. В любом случае латеральное смещение толщ, по-видимому, было не очень значительным (судя по признакам сохранения первоначальной слоистости во внешней зоне рассмотренного СК).

Верхний комплекс с аналогичной по типу волновой картиной (преимущественно хаотической) выделяется в районе бровки шельфа. Его мощность, в отличие от рассмотренного выше СК, не постоянна, и в его внешней зоне выделяется обособленный оползневой блок, выраженный в современном рельефе дна.

Кроме обширных районов Черноморской впадины с отложениями, сформированными обломочными потоками, на отдельных участках обнаружены гигантские оползневые тела [Шимкус и др., 2002]. На рис. 4 в правой части профиля НСАП, расположенного в юго-восточной части Черноморской впадины, выделен оползневой блок с вращением (показан стрелкой). Его мощность на этом фрагменте профиля составляет око-

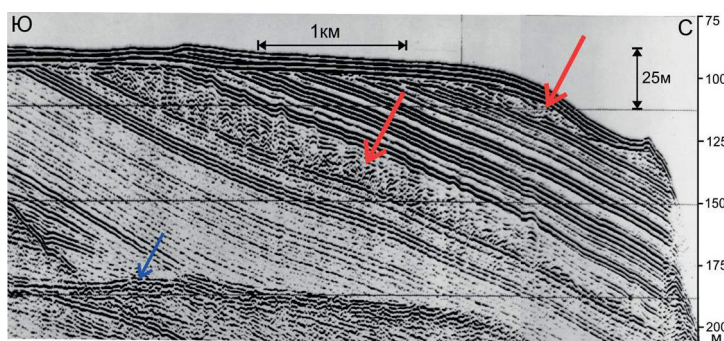


Рис. 3. Фрагмент профиля НСП через внешнюю зону шельфа в районе Босфора (красные стрелки – СК, строение которых рассматривается в тексте. Синяя стрелка – кратное отражение от дна. Вертикальная шкала справа – в метрах ($V = 1500$ м/с))

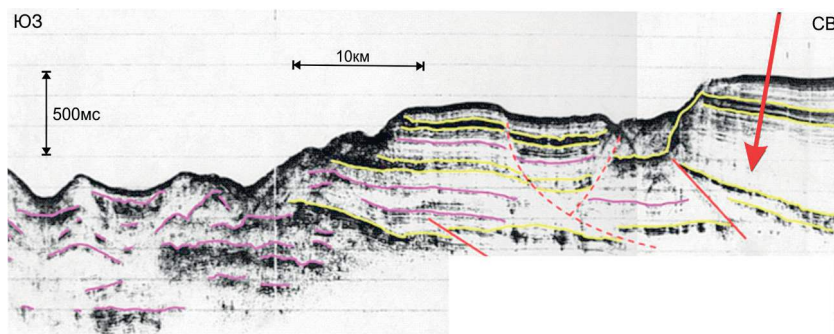


Рис. 4. Фрагмент сейсмоакустического профиля, расположенного в юго-восточной части Черноморской впадины (желтые линии – границы сеймокомплексов, внутренняя структура СК показана бордовыми линиями. Красные линии – разрывные нарушения. Стрелка указывает на оползень с вращением. Глубина воды по профилю меняется от 1200 до 1800 м)

ло 900 м, длина 13 км, внутренняя слоистая структура при этом не нарушена (рис. 4). Блок является частью сложной системы надвигов с разной амплитудой смещения. В левой части профиля, судя по волновой картине, разрез сложен сильно деформированными отложениями мощностью в несколько сотен метров.

Результаты изучения гравитационных процессов на втором этапе

Данные, полученные на втором из выделенных нами этапов исследования гравитационных процессов, отличаются прежде всего существенно более высокой разрешающей способностью исследований как по вертикали, так и по горизонтали. Основная проблема при получении данных с высоким разрешением в Черном море обусловлена его значительной глубиной – более 2000 м в пределах ложа глубоководной котловины. При наблюдениях с поверхности моря размер первой зоны Френеля (зоны, формирующей отражение) на таких глубинах при обычно используемых частотах источника превышает 100–150 м. Это означает, что объекты, находящиеся на таком или меньшем расстоянии на дне, а тем более на нижележащих поверхностях слоев, не будут разрешены на сейсмоакустических разрезах, т.е. сольются. Единственным способом повышения горизонтальной разрешающей способности является приближение измерительной установки к дну моря. Именно такой подход был реализован при инженерно-геологических изысканиях по проекту прокладки подводного трубопровода «Южный поток», а также на некоторых ЛУ ПАО «Роснефть». На этих объектах сейсмоакустические и гидролокационные исследования проводились с необитаемого автономного подводного аппарата (АНПА), идущего всего в 30–50 м над дном. Использовался АНПА Kongsberg Huglin производства Норвегии с интегрированной системой, состоящей из профилографа, гидролокатора бокового

обзора и многолучевого эхолота. Полоса частот профилографа – 1–6 кГц (частотно-модулированный сигнал), длительность посылки – 12 мс, рабочие частоты гидролокатора – 105, 410 кГц, полоса обзора – 270–300 м в каждую сторону. Максимальная глубинность по грунту составила 50 м, вертикальная разрешающая способность – 15–25 см.

Кроме исследований с АНПА, в ходе работ по трассе трубопровода «Южный поток» на разных участках с поверхности моря проводилось: высокоразрешающая сейсморазведка 2D МОГТ с 48-канальной цифровой косой с базой приема 1200 м, НЧ НСАП с источником бумер, ВЧ НСАП с параметрическим профилографом Innomar SES2000 Medium, а также видеосъемка морского дна с телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА).

Благодаря применению самых передовых аппаратурных комплексов, прежде всего использованию АНПА, была получена уникальная, недоступная ранее информация о рельефе дна и строении верхней части разреза Черноморской впадины. Ниже приводятся некоторые результаты изучения гравитационных процессов, полученные с помощью АНПА Huglin при инженерно-геологических изысканиях по проекту «Южный поток». Сбор и обработка представленных данных производились геофизическим отделом бывшего ООО «Питер Газ» (С.М. Клевшин, А.П. Демонов), интерпретация проведена А.Г. Росляковым.

При идентификации объектов использовалась обобщенная генетическая классификация, предложенная в работе [Ионов, 2012], согласно которой в группе подводных склоновых гравитационных процессов выделяются следующие подгруппы: оползни, обвалы и потоки (обломочные и турбидные). Кроме того, были приняты подходы к типизации гравитационных отложений, изложенные в работах [Обстановки..., 1990; Shanmugam, 2000; Shanmugam, 2015].

Оползни

В ходе инженерно-геологических изысканий по трассе трубопровода оползневые тела были выявлены вблизи бровки шельфа, в верхней части континентального склона, на склонах намывных валов глубоководных конусов выноса, бортах глубоководных каналов.

На рисунке ниже приведен пример проявления оползневых процессов во внешней зоне шельфа на участке Анапа – Новороссийск (рис. 5). Размеры отчленившихся и смещенных в сторону континентального склона блоков в поперечнике составляют сотни метров, мощность до 6–7 м. Осадки, подвергшиеся оползанию, представлены преимущественно глинистыми грунтами (с подчиненным содержанием песчано-алевритового материала), характеризующимися консистенцией от текучей до мягкопластичной. Вероятно, поверхность скольжения этих оползней совпадает с прослоями, имеющими заниженные прочностные характеристики (в частности, вследствие газонасыщения). Проведенные в ходе анализа данных расчеты показали [Ионов и др., 2012], что в статических условиях рассматриваемая область шельфа находится в относительно устойчивом состоянии, но при сейсмическом

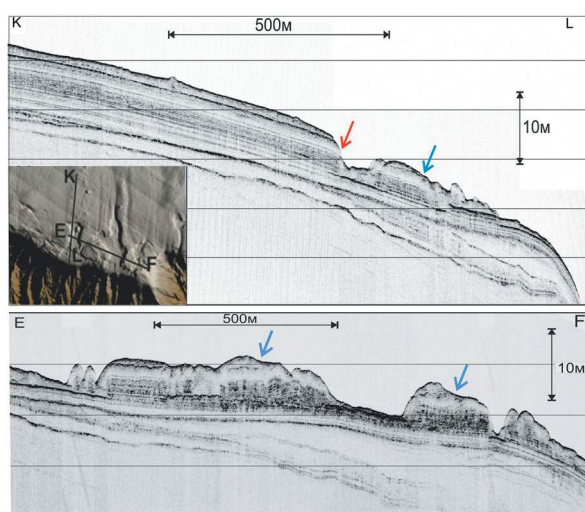


Рис. 5. Оползневые блоки (синие стрелки) вблизи бровки Анапского шельфа на данных профилографа (красная стрелка – стенка отрыва; на врезке – цифровая модель рельефа дна и положение представленных фрагментов профилей; глубина моря 90–110 м, уклон дна 0,5–2°)

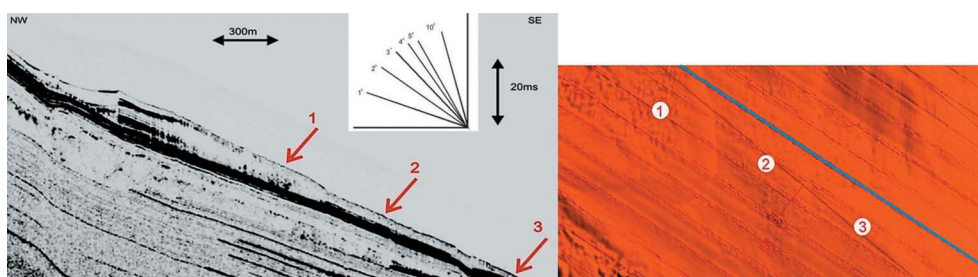


Рис. 6. Трансформация оползня в обломочный поток и типы микрорельефа дна (справа) (на участке 1 наблюдается всхолмленный рельеф, соответствующий поверхности оползневого тела (slump). Перед головной частью оползня отмечается смена микрорельефа – от слабовсхолмленного (2) до гладкого с микроскладками сжатия (3). В хвостовой части оползня присутствует крупный фрагмент с ненарушенной внутренней структурой (slide). Уклон дна около 1,5°)

воздействии в 7–8 баллов следует ожидать потерю устойчивости дисперсных грунтов и массового проявления оползневых процессов [Ионов, 2012; Росляков и др., 2021].

Наиболее широко распространены оползни на континентальном склоне и подножии. В некоторых случаях на данных профилографа наблюдается смена типов внутренней волновой картины оползней от «слоистой» или сохраняющей признаки «слоистости» до хаотической и акустически прозрачной (вниз по склону). Очевидно, это следует интерпретировать как трансформацию оползневых блоков с ненарушенной внутренней структурой (в зарубежной литературе – slides) в массивы, полностью утратившие первичные структурно-текстурные характеристики (slumps), и далее – в обломочные потоки [Shanmugam, 2000; Shanmugam, 2015] (рис. 6). Пространственная связь обломочных потоков с оползневыми блоками фиксировалась на многих участках трассы трубопровода, причем в некоторых случаях, предположительно, наблюдалось и дальнейшее преобразование обломочных потоков в турбидные потоки вниз по склону (см. также рис. 10).

Оползни были обнаружены также в пределах суббассисальной равнины на глубинах более 2100 м. Одно из таких оползневых тел, образовавшееся на борту глубоководного канала в дистальной части конуса выноса Дуная, показано на рис. 7.

Необходимо отметить, что наибольшая активизация гравитационных процессов в Черноморской впадине происходила в позднем неоплейстоцене, в период максимума последнего оледенения, когда уровень моря был ниже современного и вся территория современного шельфа представляла собой низменную сушу. Во время последовавшей затем голоценовой трансгрессии в результате отступления береговой линии от бровки сегодняшнего шельфа в сторону суши эти процессы существенно замедлились. Следствием такого развития бассейна является то, что большая часть оползневых тел на континентальном склоне и подножии в настоящее время перекрыта ненарушенным слоем голоценовых (и верхнеплейстоценовых) морских осадков. Выдержанная мощность этих осадков и плащеобразный характер залегания приводят к тому, что погребенные под ними оползни отчетливо проявляются в современном рельефе дна. Такая четкая выраженность в рельефе доголоценовых оползневых

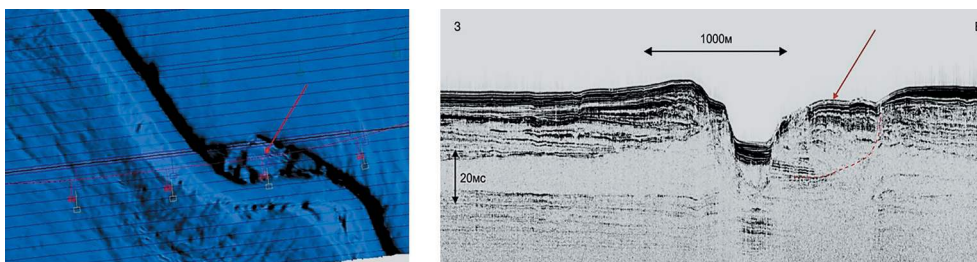


Рис. 7. Оползневой блок на борту глубоководного канала (красная стрелка) в центральной части Западно-Черноморской впадины (глубина моря 2110–2130 м)
Слева – цифровая модель рельефа дна, справа – данные профилографа (поверхность скольжения выделена пунктиром)

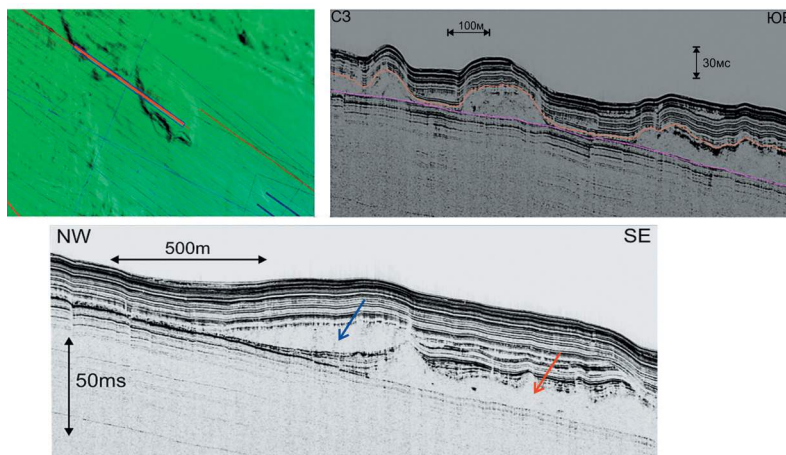


Рис. 8. Отложения погребенных оползней и их проявление в современном рельефе в нижней части континентального склона Болгарии

(вверху слева: цифровая модель рельефа дна и положение представленного фрагмента профиля (красная линия); вверху справа: оранжевая линия – кровля оползневых тел, сиреневая – подошва; внизу: погребенные оползни разных генераций (красная и синяя стрелки))

блоков и их характерных элементов (стенок отрыва, фронтальных уступов и др.) может ввести в заблуждение интерпретаторов, работающих только с данными батиметрии. Эти оползни могут быть приняты за современные, и в этом случае будет сделан ошибочный вывод о гравитационной неустойчивости придонного слоя грунтов с соответствующим завышением степени риска для инженерных сооружений. Между тем оползание блоков, показанных, например, на рис. 8, произошло по меньшей мере 10 000 лет назад, что следует из сопоставления мощности перекрывающей их толщи и средней скорости осадконакопления в этой части моря в позднем неоплейстоцене–голоцене. Таким образом, в действительности данный участок склона находится в стабилизированном состоянии уже значительное даже по геологическим меркам время.

Что касается проявлений оползневых процессов на современном и позднеголоценовом этапе, затрагивающих самые молодые осадки, то они также были обна-

ружены на многих участках континентального склона и подножия. В частности, были обнаружены признаки оползания (оплывания) самого верхнего осадочного слоя мощностью в несколько десятков сантиметров с образованием специфических форм донного микро-рельефа в виде полого извилистых или серповидных гряд и валиков высотой обычно 2–3 м (рис. 9). По данным пробоботбора, эти осадки представлены алевритово-глинистыми илами текучей и текучепластичной консистенции. В случае серповидной формы вершина «серпа» направлена вверх по склону, а края – вниз. По-видимому, края оползневых валиков, изначально расположенных вдоль склона, разворачиваются вниз по склону и опережают в своем движении центральные их части (возможно, из-за меньшего трения).

Одной из разновидностей гравитационного перемещения материала является осадочный крип – медленная деформация, обусловленная постоянной нагрузкой, вызывающей напряжения, которые могут

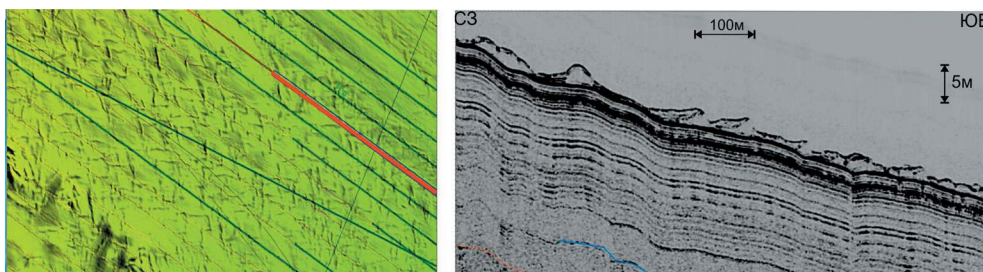


Рис. 9. Микрорельеф, вызванный оползанием верхнего осадочного слоя на континентальном склоне Болгарии
(справа: данные профилографа; слева: цифровая модель рельефа дна, красная линия – положение представленного фрагмента профиля; уклон дна около 2°)

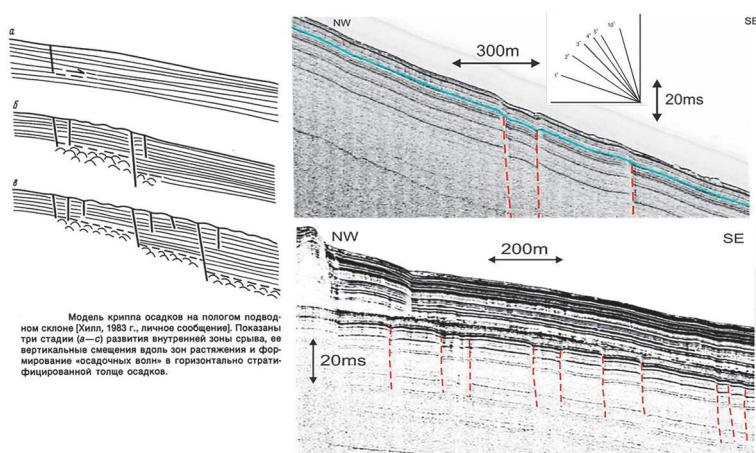


Рис. 10. Проявление крипа осадков на Болгарском континентальном склоне (справа)

(слева – модель формирования крипа по [Обстановки..., 1990]. Красный пунктир – разрывные нарушения, связанные с крипом (справа сверху – молодые, справа внизу – погребенные))

существовать до нескольких тысяч лет [Обстановки..., 1990]. Часто крип сопровождается незначительными деформациями и образованием малоамплитудных разрывных нарушений. Подобные деформации были обнаружены в коридоре трассы «Южный поток» в Болгарском секторе Черного моря (рис. 10). На рисунке видно, что мелкие разрывы с амплитудой смещения слоев не более 1–1,5 м, сопровождающие крип, не проявляются в виде вертикальных смещений на дне, а затухают в самом верхнем придонном слое илов, вызывая пологие пликативные изгибы в донном рельефе. Несмотря на малую амплитуду этих разрывов, само их образование указывает на медленное движение затрагиваемой ими толщи вниз по склону, которое в определенный момент может ускориться и перейти в оползневой процесс. Подобный переход толщи придонных осадков с признаками крипа в оползень был зафиксирован в ходе работ на одном из участков на подножии склона в Восточно-Черноморской впадине.

Спровоцировать оползание осадков может повышенное газонасыщение отдельных слоев, поскольку даже незначительное содержание газа в грунтах приводит к снижению их физико-механических показателей (угла внутреннего трения, сопротивления недренированному сдвигу, модуля деформации) на величину до 20% [Маштаков, 2013]. Подтверждением этого служит неоднократно отмечающиеся амплитудные аномалии, предположительно связанные с газом, вблизи плоскостей скольжения оползневых тел и плотностных потоков.

Обломочные потоки

Обломочные потоки – гравитационные потоки осадочного материала с пластической реологией и ламинарным режимом, отложение материала происходит в результате резкой остановки потока [Shanmugam, 2000]. Сейсмическими признаками обломочных потоков являются акустически прозрачная волновая картина (местами – хаотическая запись), эрозионный характер подошвы, неровная, часто выпуклая вверх кровля, характерный микрорельеф на данных МЛЭ. Примеры проявления отложений обломочных потоков, обнаруженных в коридоре трассы трубопровода, показаны на рис. 11, 12. Желтым цветом показана эрозионная поверхность, выработанная потоком в подстилающих отложениях. После остановки основного тела обломочного потока (синяя стрелка) происходило, а возможно, происходит и в настоящее время растекание тонкого поверхностного слоя (красная стрелка) с образованием характерных форм микрорельефа дна. Уклон дна около 2°. В нижней части разреза наблюдаются отложения погребенных гравитационных потоков и оползневые складки.

Идентификация подобных объектов как отложений обломочных потоков была подтверждена данными статического зондирования и пробоотбором грунтовыми трубками. Наличие грубообломочного материала (песка, алевроита) и битой мелководной ракушки в этих отложениях, залегающих в нижней части склона, на континентальном подножии и даже в цен-

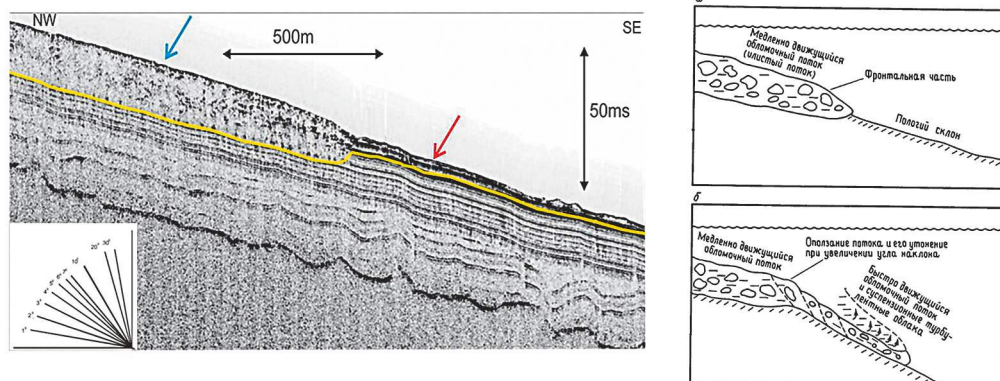


Рис. 11. Отложения обломочного потока в нижней части континентального склона Болгарии (слева) (справа – модель из работы [Обстановки..., 1990])

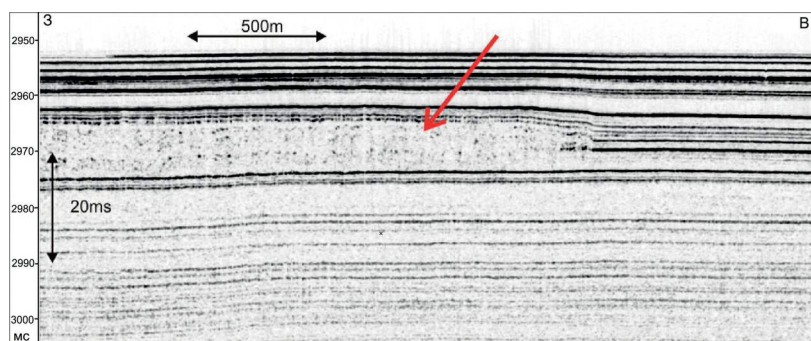


Рис. 12. Отложения погребенного плотностного потока (красная стрелка) в центральной части глубоководной впадины (глубина моря 2215 м) (профиль ориентирован перпендикулярно направлению потока, распространявшегося, предположительно, со стороны Турецкого шельфа)

тральной части глубоководной впадины, однозначно свидетельствует о переносе материала гравитационными потоками из области шельфа.

Высокая активность гравитационных процессов в четвертичное время привела к тому, что в строении верхней части разреза на абиссальной равнине наблюдается чередование относительно грубозернистых отложений плотностных потоков (в том числе турбидных) и тонкозернистых фоновых осадков. Таким чередованием объясняется высокая контрастность амплитуд отражений на полученных сейсмоакустических разрезах, помимо возрастания амплитуд, связанных с газонасыщением отдельных слоев (рис. 12).

В ходе работ на глубинах 1500–2000 м были обнаружены как погребенные отложения обломочных потоков (рис. 12), так и залегающие на поверхности и не перекрытые даже маломощным слоем морских глубоководных осадков. Последнее обстоятельство позволяет заключить, что гравитационная транспортировка осадков на огромные расстояния от берега происходила не только в регрессивные этапы, но и в значительной степени продолжается и в настоящее время при высоком уровне моря. Наиболее вероятными триггерами, по-видимому, служат сейсмические события.

Выводы

Применение необитаемого автономного подводного аппарата (АНПА) при инженерно-геологических изысканиях позволило качественно повысить уровень знаний о рельефе дна, строении верхней части разреза и процессах седиментации в глубоководной зоне Черного моря. Установлено более широкое, чем предполагалось ранее, распространение отложений гравитационного генезиса во всех морфоструктурных зонах моря, включая субабиссальную равнину. Получены уникальные данные об особенностях и интенсивности современных склоновых процессов, в частности о характере деформаций в самом верхнем слое донных осадков мощностью 0,5–2 м.

Результаты исследований позволяют заключить, что правильность наших представлений об осадконакоплении в глубоководных обстановках, в том числе о гравитационных процессах, в огромной степени определяется уровнем развития техники и технологии морских геофизических исследований.

Дата поступления рукописи в редакцию 07.05.2025

Дата положительной рецензии 26.05.2025

Дата принятия рукописи в печать 26.05.2025

ЛИТЕРАТУРА

1. *Архангельский А.Д.* Оползание осадков на дне Черного моря и геологическое значение этого явления. Бюлл. МОИП, отд. геол. 1930. Т. 8, № 1–2. С. 32–80.
2. *Боговяленский В.И., Никонов Р.А.* Природные угрозы при освоении ресурсов нефти и газа в Мировом океане: катастрофические оползни в Мексиканском заливе // Бурение и нефть. 2020. № 7–8. С. 20–25.
3. *Ионов В.Ю., Калинин Э.В., Фоменко И.К., МIRONЮК С.Г.* Условия формирования подводных оползней в отложениях бровки континентального склона Черного моря в районе п. Архипо-Осиповка // Инженерная геология. 2012. № 6. С. 36–46.
4. *Ионов В.Ю.* Опыт исследования подводных оползней для обоснования строительства морских нефтегазовых сооружений // Инженерные изыскания. 2012. № 6. С. 52–63.
5. *Маштаков А.С.* Анализ комплексного влияния на несущую способность грунтов циклических воздействий и мелкозалегающего газа // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 11. С. 33–36.
6. Обстановки осадконакопления и фации. В 2 томах. Т. 2: пер. с англ. / под ред. Х. Рединга. М.: Мир, 1990. 384 с.
7. *Росляков А.Г., Демонов А.П.* Особенности геологического строения шельфа в районе заповедника Утриш // Сборник на-

учных трудов «Наземные и морские экосистемы полуострова Абрау: история, состояние, охрана». Т. 5. Научные труды. Анапа, 2021. С. 182–189.

8. *Старовойтов А.В.* Геологическая интерпретация сейсмических данных. М.: «КДУ», «Университетская книга», 2022. 322 с.

9. *Старовойтов А.В., Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л., Стручков В.А., Кульницкий Л.М.* Структура позднекайнозойских отложений континентального склона и его подножия в Черном море и ее связь с тектоникой. В сб.: «Изучение геологической истории и процессов современного осадкообразования Черного и Балтийского морей». Ч. I. Киев: «Наукова думка», 1984. С. 78–83.

10. *Старовойтов А.В.* Структура плиоцен-четвертичных отложений и гравитационные процессы на континентальном склоне и подножии в Черном море: автореферат на соиск. уч. ст. канд. геол.-минер. наук. М., 1985. 16 с.

11. *Туголесов Д.А., Горишков А.С., Мейснер Л.Б., и др.* Тектоника мезокайнозойских отложений Черноморской впадины. М.: Недра, 1985.

12. *Шимкус К.М., Москаленко В.Н., Евсюков Ю.Д., и др.* О роли неотектоники, оползневых и эрозионно-аккумулятивных процессов в формировании прикавказской материковой окраины // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / под. ред. Зацепина А.Г., Флинта М.В. М.: Наука, 2002. С. 402–416.

13. Carter R.M. A discussion and classification of subaqueous mass transport, with particular application to grain-flow, slurry flow and fluxoturbidites. *Earth Science Reviews*. 1975. Vol. 11, № 2. P. 145–177.
14. Dingle P.V. Large allochthonous sediment masses and their role in the construction of the continental slope and rise off Southwestern Africa, *Marine Geol.* 1980. Vol. 37, № 3/4. P. 333–354.
15. Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s–1990s): Deep-water processes and facies models – A critical perspective // *Marine and Petroleum Geology*. 2000. № 17. P. 285–342.
16. Shanmugam G. The landslide problem // *Journal of Palaeogeography*. 2015. Vol. 4, № 2. P. 109–166.

REFERENCES

1. Arkhangelsky A.D. Landslides at the bottom of the Black Sea and the geological significance of this phenomenon. *Bull. MOIP, ed. geol.* 1930; 8 (1–2): 32–80 (in Russian).
2. Bogoyavlensky VI, Nikonov R.A. Natural threats in the development of oil and gas resources in the World Ocean: catastrophic landslides in the Gulf of Mexico. *Drilling and oil*. 2020; (7–8): 20–25 (in Russian).
3. Ionov VYu, Kalinin EV, Fomenko IK, Mironyuk SG. Conditions of formation of underwater landslides in the sediments of the edge of the continental slope of the Black Sea in the area of the settlement of Arkhipo-Osipovka. *Engineering Geology*. 2012; (6): 36–46 (in Russian).
4. Ionov VY. The experience of studying underwater landslides for the construction of offshore oil and gas facilities justification. *Engineering surveys*. 2012; (6): 52–63 (in Russian).
5. Mashtakov AS. Analysis of the complex effect of soils, cyclic impacts and shallow-lying gas on the bearing capacity. *Alternative energy and ecology*. 2013; (11): 33–36 (in Russian).
6. Reding H, editor. Sedimentation and facies conditions. In 2 volumes, vol. 2: translated from English. Moscow: Mir, 1990. 384 p. (in Russian).

7. Roslyakov AG, Demonov AP. Utrish reserve shelf geological features. *Collection of scientific papers Terrestrial and marine ecosystems of the Abrau Peninsula: history, condition, protection*. Vol. 5. Scientific papers. Anapa. 2021; (5): 182–189 (in Russian).
8. Starovoytov AV. Seismic data geological interpretation. Moscow: “KDU”, “University Book”, 2022. 322 p. (in Russian).
9. Starovoytov AV, Kalinin AV, Kalinin VV, Pivovarov BL, Struchkov VA, Kulnitsky LM. The structure of Late Cenozoic Black Sea deposits continental slope and foot and its relation to tectonics. In collection: “Study of the geological history and processes of modern sedimentation of the Black and Baltic Seas”, part I. Kiev: Naukova Dumka, 1984. P. 78–83 (in Russian).
10. Starovoytov AV. Structure of Pliocene-Quaternary sediments and gravitational processes on the continental slope and foot in the Black Sea. Abstract for the degree of Candidate of Geological Sciences. Moscow, 1985. 16 p. (in Russian).
11. Tugolesov DA, Gorshkov AS, Meisner LB, et al. Tectonics of Meso-Cenozoic deposits of the Black Sea Basin. Moscow: Nedra, 1985 (in Russian).
12. Shimkus KM, Moskalenko VN, Evsyukov YuD, et al. On the role of neotectonics, landslide and erosion-accumulative processes the Caucasian continental margin formation. *Comprehensive studies of the northeastern part of the Black Sea*. Zatsepin A.G., Flint M.V., editors. Moscow: Nauka, 2002. P. 402–416 (in Russian).
13. Carter R.M. A discussion and classification of subaqueous mass transport, with particular application to grain-flow, slurry flow and fluxoturbidites. *Earth Science Reviews*. 1975; 11 (2): 145–177.
14. Dingle PV. Large allochthonous sediment masses and their role in the construction of the continental slope and rise off Southwestern Africa. *Marine Geol.* 1980; 37 (3/4): 333–354.
15. Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s–1990s): Deep-water processes and facies models – A critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*. 2000; (17): 285–342.
16. Shanmugam G. The landslide problem. *Journal of Palaeogeography*. 2015; 4 (2): 109–166.

ОБ АВТОРАХ

РОСЛЯКОВ

Александр Геннадьевич



Окончил геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова в 1982 г., старший научный сотрудник кафедры нефтегазовой седиментологии и морской геологии геологического факультета. Область научных интересов – морская геология, интерпретация данных морских сейсмических исследований, выявление геологических опасностей. Автор более 100 научных статей и 1 монографии.

СТАРОВОЙТОВ

Анатолий Васильевич



Окончил геологический факультет МГУ в 1971 г., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры сейсмологии и геоакустики, заслуженный преподаватель геологического факультета МГУ. Область научных интересов – морская геология, георадиолокация, инженерно-геофизические исследования на суше и акваториях. Автор более 200 научных работ, включая 11 книг.

КЛЕЩИН

Сергей Михайлович



Окончил Казахский политехнический институт в 1974 г. Работал в ОАО «АМИГЭ», ОАО «МАГЭ», ООО «ДеКо Проект», ООО «ДМИГЭ», ООО «Газпром инжиниринг» (прежнее название ООО «Питер Газ», начальник геофизического отдела), ООО «Сабси Сервей Солюшенс» (начальник департамента инжиниринга). Область научных интересов – технология морских сейсмических и гидролокационных исследований, обработка сейсмических данных.