



UNDERWATER CANYONS OF THE SOUTHWESTERN OUTSKIRTS OF SOUTHERN BAIKAL AS PRESUMABLE TRANSITERS OF TECHNOGENIC MATERIALS TO THE ABYSSAL SURFACE

E.E. Kononov ¹✉, N.A. Gubin ²

¹ Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Ulan-Batorskaya St, Irkutsk 664033, Russia

² Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St, Irkutsk 664074, Russia

ABSTRACT. Numerous publications by domestic and foreign authors deal with a significant role of underwater canyons in transit of loose material from the littoral to the abyssal surfaces of the seas. Lake Baikal fully corresponds in its hydrodynamic and bathymetric parameters to sea water basins, and the Baikal canyons are similar in their morphological and morphometric factors to sea canyons. A digital elevation model of the southwest underwater tip of the lake, generated based on a large array of bathymetric data, allowed identifying clearly defined valleys of the Shamanka and Slyudyanka canyons. The data obtained during the study of the canyon-valley area, carried out using special geophysical measuring instruments – Kongsberg EM710S multibeam echosounder and Knudsen CHIRP 3260 profilograph, – and analysis of the published materials showed a rather high degree of confindness of coarse debris to the canyon valleys and alluvial fans which implies their significant role in sediment transit. It has been shown that high seismicity of the Baikal basin and active wave conditions give rise to the formation of movable loose sediment masses and to the occurrence of gravity flows in the canyon valleys. Climate changes over the last decades contribute also to permafrost decomposition in the Baikal basin and to new-sediment transport into the lake. It is implied that an intensive development of the coastline leads to the coastal accumulation of a large amount of industrial and municipal contaminants which can move through the canyons to different distances into the lake water area. To date, there is no definite answer to the question about an actual role of underwater canyons in the transit of technogenic wastes to the abyssal lake surface. This requires organized large-scale specialized fieldwork with the use of high-precision geological-geophysical measuring instruments, and systematic sampling and thorough analysis of the bottom material.

KEYWORDS: Baikal; digital elevation model; canyon; sediments; transit; pollution

FUNDING: Not specified.



SHORT COMMUNICATION

Correspondence: Evgeniy E. Kononov, ekon@7395.ru

Received: January 19, 2022

Revised: August 1, 2022

Accepted: August 15, 2022

FOR CITATION: Kononov E.E., Gubin N.A., 2023. Underwater Canyons of the Southwestern Outskirts of Southern Baikal as Presumable Transmitters of Technogenic Materials to the Abyssal Surface. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (1), 0684. doi:10.5800/GT-2023-14-1-0684

ПОДВОДНЫЕ КАНЬОНЫ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЫ ЮЖНОГО БАЙКАЛА – ВОЗМОЖНЫЕ ТРАНЗИТЕРЫ ТЕХНОГЕННОГО МАТЕРИАЛА НА АБИССАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Е.Е. Кононов¹, Н.А. Губин²

¹ Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

АННОТАЦИЯ. Многочисленные зарубежные и отечественные публикации свидетельствуют о большой роли подводных каньонов в транзите рыхлого материала от литорали к абиссальным поверхностям морей. Озеро Байкал по своим гидродинамическим и батиметрическим параметрам вполне соответствует морским водным бассейнам, а байкальские каньоны по морфологическим и морфометрическим показателям аналогичны морским. Построенная на основе огромного массива батиметрических данных цифровая модель подводного рельефа юго-западного окончания озера позволила выделить вдоль подводного склона хорошо развитые долины Шаманского и Слюдянского каньонов. Данные, полученные во время исследования территории, занятой долинами каньонов, с использованием специальной геофизической аппаратуры – многолучевого эхолота Kongsberg EM710S, а также профилографа «Knudsen CHIRP 3260», анализ опубликованных материалов показали довольно высокую степень приуроченности грубообломочных осадков к долинам каньонов, их конусам выноса, что может свидетельствовать об их значительной роли в транзите осадков. Показано, что высокая сейсмичность Байкальской впадины, активный волновой режим создают благоприятные условия для формирования подвижных рыхлых масс и возникновения гравитационных потоков по долинам каньонов. Изменения климата в последние десятилетия также создают условия для разрушения вечномёрзлых грунтов в бассейне Байкала и поступления в озеро новых масс осадков. Предполагается, что интенсивное освоение береговой полосы способствует накоплению вдоль побережья озера большого количества промышленных и бытовых отходов, которые могут через подводные каньоны транспортироваться в акваторию озера на разное расстояние. На сегодняшний день однозначный ответ на вопрос о реальной роли подводных каньонов в транзите техногенных отходов через долины каньонов к абиссальной поверхности озера не получен. Необходима организация обширных специализированных полевых исследований с применением высокоточной геолого-геофизической аппаратуры, планомерный отбор и тщательный геолого-геохимический анализ донного материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Байкал; цифровая модель рельефа; каньон; осадки; транзит; загрязнение

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Не указано.

1. ВВЕДЕНИЕ

Подводные каньоны являются важными каналами, способными транспортировать большое количество осадков от береговой линии и литорали на абиссальную равнину с помощью гравитационных потоков, выступают в качестве поглотителей и каналов для части осадков и связанных с ними органических остатков и загрязнителей [Harris, Whiteway, 2011; Canals et al., 2013]. Каньоны Байкала, так же как и морские, являются каналами сноса терригенного материала из береговой зоны на большие глубины [Karabanov, Fialkov, 1987; Nelson et al., 1995; Evangelinos et al., 2017]. Важная роль каньонов в переносе осадков разного генезиса в глубоководные части Байкальской котловины впервые была отмечена еще в 50-х годах [Patrikeeva, 1959]. По каньонам, по мнению Г.С. Голдырева и др. [Goldyrev et al., 1979], мутьевые потоки могут в течение нескольких часов вынести на глубоководную поверхность и отложить слой осадков, который при нормальном осадконакоплении будет формироваться в течение 3–7 тыс. лет. Возможным механизмом, запускающим

гравитационные потоки, может быть высокий уровень и частота больших волнений на оз. Байкал [Le Dantec et al., 2016; Kononov et al., 2021]. В 1977 г. С.М. Анциферовым и Р.Д. Косьян [Antsiferov, Kosyan, 1977] экспериментально установлено, что примерно 80 % материала переносится в его придонном слое вдольбереговым потоком. При пересечении потоком каньона практически все эти придонные наносы попадают в его русло. Во время сильных штормов (которые характерны для озера) происходит обильное поступление как взвешенных, так и влекомых наносов в верховье каньона и их перенос по руслу на глубину.

По мнению О.Т. Русинек и др. [Rusinek et al., 2009], верховья каньонов являются ловушками для растительного детрита и любой другой органики, поступающей в береговую зону. Днища каньонов покрыты толщей донных осадков, представленных не только тонкодисперсными илами, но и песками, дресвой, гравием. Это указывает на существование тесной литодинамической связи с береговой зоной, из которой в каньоны поступает крупнообломочный материал,

транспортируемый на большие глубины. При этом существуют каньоны, которые утратили такую связь и по которым транспортируются только илистые частицы и продукты разрушения бортов.

Для формирования гравитационных и мутьевых потоков необходимым условием является сейсмическая активность в пределах водного бассейна [Mohrig, Marr, 2003]. Высокая сейсмичность территории Байкальской впадины явно способствует интенсивному обрушению и оползанию подводных склонов, бортов каньонов, формированию критически рыхлых масс и их смещению вниз по подводному склону и подводным долинам.

В последние 10–15 лет Е.Г. Вологиной с коллегами [Vologina, Sturm, 2009; Och et al., 2014; Vologina et al., 2021] были проведены масштабные исследования вещественного состава и распределения донных осадков озера, что позволило им провести их типизацию и районирование [Vologina, Sturm, 2009; Och et al., 2014; Vologina et al., 2021].

Техногенное освоение береговой полосы озера, строительство туристических баз и кемпингов, не отвечающих требованиям экологической безопасности, отсутствие логистики и инфраструктуры для вывоза и утилизации твердых и жидких отходов могут способствовать развитию новой экологической угрозы уникальному озеру – перемещению этих отходов от береговой линии на абиссальную поверхность. Озеро Байкал все чаще сталкивается с давлением антропогенного загрязнения береговой линии биогенными веществами в результате неадекватной очистки сточных вод [Timoshkin et al., 2016], которые могут быть объектом переноса в глубь котловины посредством подводных долин.

Всестороннее изучение авторами работ [Khlystov et al., 2018; Kononov et al., 2019a, 2019b, 2021; Kononov, 2021] подводных каньонов в течение многих лет естественным образом привело к мысли о попытке предварительной оценки долин подводных каньонов озера как возможных каналов переноса рыхлых осадков от береговой линии к абиссали. Предлагаемая работа посвящена началу обсуждения проблемы вероятного транзита продуктов техногенеза от береговой линии к абиссальной поверхности озера Байкал через долины подводных каньонов.

Следует отметить, что обширные специализированные исследования, направленные на установление уровня техногенного загрязнения абиссальной поверхности и роли подводных долин в транзите элементов загрязнения, не проводились.

2. МЕТОДЫ

При проведении исследований важное значение имело знание особенностей донного рельефа озера. Для решения этой задачи был проведен анализ батиметрических карт, составленных по данным съемок однолучевым эхолотом при создании навигационной карты 1:200000 масштаба (INTAS-99-1669) [De Batist et al.,

2002]. Также были использованы батиметрические материалы, полученные с помощью мобильной системы многолучевого эхолота Kongsberg EM710S (МЛЭ) и профилографа «Knudsen CHIRP 3260» [Gubin et al., 2021, 2022]. В результате поэтапной обработки полученного батиметрического материала с применением современных ГИС-технологий была создана цифровая модель рельефа (ЦМР) юго-западной оконечности Южной котловины озера (ЮК), что позволило получить детальную информацию о донном рельефе.

Методы акустического распознавания донного грунта применяются достаточно давно как отечественными, так и зарубежными исследователями [De Moustier, 1986; Kushal et al., 1995; Brekhovskikh, Godin, 2007]. МЛЭ имеет функцию водного столба и обратного рассеяния по линии развертки лучей, что позволяет дать характеристику донных осадков. При проведении батиметрических съемок дополнительно были получены локальные данные об интенсивности отраженного эхосигнала, которые были интегрированы в ЦМР. Интенсивность сигнала обратного рассеяния в значительной степени определяется наличием в толще воды и на дне различных объектов и их физическими свойствами (взвешенные минеральные частицы, пузырьки воздуха, а также неоднородность плотности и шероховатость донной поверхности) [Gaida et al., 2020]. Существующий опыт определения характеристик состава донного грунта основан на сравнении фактических вариаций интенсивности сигнала обратного рассеяния с ожидаемым акустическим откликом в соответствии с моделью Д.Р. Джексона [Jackson, Richardson, 2007]. Модель формируется путем задания значений ряда коэффициентов, таких как частота излучаемого сигнала, потери, шероховатость, скорость звука, плотность и объем отложений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вдоль подводного склона оз. Байкал зафиксировано более 100 каньонов [Karabanov, Fialkov, 1987]. Максимальный интерес для целей работы представляют каньоны, расположенные в местах наиболее интенсивного техногенного воздействия, а среди них – каньоны, верховья которых начинаются в непосредственной близости от береговой линии на небольших глубинах. Географически большинство таких каньонов расположено вдоль южного борта Южной, восточного борта Средней и северного борта Северной котловин озера. Авторами детально исследованы и описаны морфологические и морфометрические характеристики большинства каньонов указанных бортов впадины [Khlystov et al., 2018; Kononov et al., 2019a, 2019b, 2021; Kononov, 2021].

Исследования авторов по обозначенной проблеме локализованы в районе юго-западной оконечности Южной котловины по таким причинам, как:

– близость верховьев каньонов к береговой линии (что важно для инициирования литопотоков от берега в глубь озера);

– высокая сейсмотектоническая активность (важна для формирования рыхлых масс и инициирования литопотоков);

– вдоль береговой полосы много населенных пунктов, хорошо развита промышленная, транспортная инфраструктура и туризм, а следовательно, высок уровень техногенного загрязнения.

Наиболее заметными подводными каньонами района являются Слюдянский и Шаманский (рис. 1).

Верховья Слюдянского каньона располагаются напротив устья р. Слюдянка. Прямолинейная долина каньона протягивается практически от береговой линии на северо-восток, где примерно на расстоянии 6 км от береговой линии на глубине примерно 750 м упирается в тектогенный уступ и резко поворачивает на юго-восток в сторону глубоководных частей котловины. Угол наклона тальвега долины около 7°. Поперечный профиль долины трапециевидный с шириной днища до 500–600 м и глубиной вреза 150–300 м. Вдоль бортов долины широко развиты овраги, блоки проседания и оползневые структуры. Долина каньона завершается обширным конусом выноса, достигающим глубины 1250–1270 м. Протяженность каньона 10–11 км [Khlystov et al., 2018]. Восточнее долины Слюдянского каньона до устья р. Мангунтай рельеф поверхности подводного склона чрезвычайно неровный, сильно расчлененный и представляет собой чередование глубоковрезанных V-образных линейных форм (оврагов) и грядообразных или плосковершинных приподнятых участков – остатков более древней поверхности (танхойской) шельфа и берегового склона, крутизна которого резко возрастает при приближении к абиссальной равнине.

Шаманский каньон является левым притоком Слюдянского, имеет протяженность около 4 км, а уклон тальвега в верховьях достигает 10–11°. Долина каньона прямолинейная, трапециевидная с шириной днища 100–150 м и глубиной вреза до 150 м. Вдоль бортов долины развиты многочисленные овраги, блоки проседания и оползни.

Для исследований донных осадков был использован МЛЭ «Kongsberg EM710S». Параметры определялись по характеристикам структуры дна, размерам зерен наносов, пористости, уклонам дна и водопроницаемости [Gubin et al., 2021, 2022]. На полученном изображении (рис. 2) достаточно четко видны линейно вытянутые полосы красного и красно-зеленого цвета, топографически совпадающие с днищами Шаманского и Слюдянского каньонов и с поверхностью конуса выноса Слюдянского каньона, а также с долинами оврагов, разрезающих подводный склон восточнее указанного каньона и северный подводный склон котловины. Названные цвета означают уровень отраженного сигнала примерно 20 и 25 дБ. Красный цвет свидетельствует о том, что данные элементы рельефа перекрыты песком и обломками более крупной фракции. Зеленые области отражают сигналы –30 дБ – суглинки. Сине-зеленый цвет (–35 дБ) указывает на суглинки и илы. Пересекаемые долинами склоновые поверхности окрашены в синий цвет с уровнем отраженного сигнала –40 дБ, что соответствует глинам. Глинами представлена и наиболее глубокая абиссальная поверхность в восточной части рис. 2.

Сопоставление местоположения отбора колонок керна Е.Г. Вологиной и др. [Vologina et al., 2021], полученных с донной поверхности в юго-западной оконечности

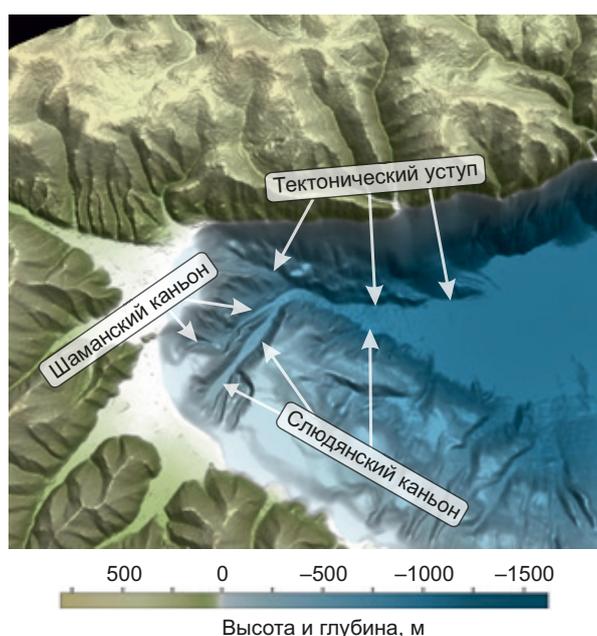


Рис. 1. Основные элементы рельефа донной поверхности у юго-западной оконечности Южной котловины [Kononov et al., 2021, с изменениями].

Fig. 1. The main elements of the bottom surface relief at the southwestern tip of the Southern Basin [Kononov et al., 2021, modified].

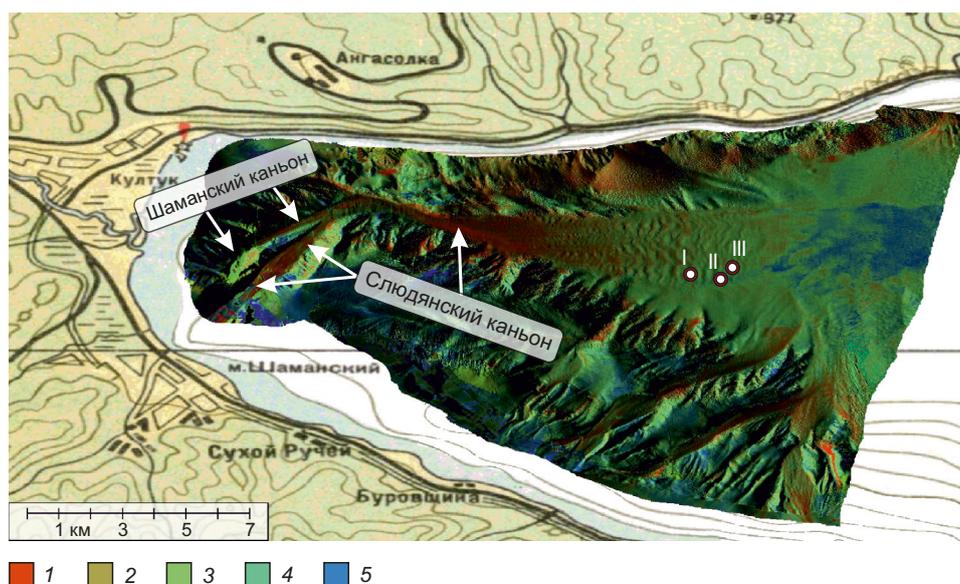


Рис. 2. Состав грунтов донной поверхности юго-западной оконечности Южной котловины.

Белые кружки с цифрами I, II, III – приблизительное расположение мест отбора колонок керна [Vologina et al., 2021]. Состав грунтов: 1 – пески, возможно галечные отложения; 2 – преимущественно песчаные отложения; 3 – суглинки; 4 – суглинки и илы; 5 – глины.

Fig. 2. The composition of the grounds of the bottom surface of the southwestern tip of the Southern basin.

White circles with numbers I, II, III show approximate location of the core sampling sites [Vologina et al., 2021]. Composition of grounds: 1 – sands, presumably pebble deposits; 2 – mainly sand deposits; 3 – loams; 4 – loams and silts; 5 – clays.

озера с элементами донного рельефа, показало, что три колонки с турбидитами и песчано-алевритистым материалом спозиционировались на периферии конуса выноса Слюдянского каньона, чуть севернее уступа древней генерации подводного склона танхойской поверхности [Khlystov et al., 2018].

4. ОБСУЖДЕНИЕ. ФАКТОРЫ ТРАНЗИТА МАТЕРИАЛА В ГЛУБЬ ОЗЕРНОГО БАССЕЙНА

Приведенный небольшой пример комплексного исследования донных осадков в районе юго-западной оконечности озера указывает на возможный транзит через долины Шаманского и Слюдянского каньонов, а также через долины склоновых оврагов крупнозернистого материала от береговой линии до глубин 1200–1250 м и на расстояние примерно 10–12 км от берега. Транзиту здесь, по-видимому, способствует прямолинейный характер русел каньонов (и оврагов) и повышенный уклон тальвегов долин от 7 до 11° при среднем уклоне тальвегов байкальских каньонов около 4.1° [Kononov et al., 2021]. Обнаружение крупнозернистого материала в керне на поверхности конуса выноса севернее древней генерации подводного склона озера [Vologina et al., 2021] подтверждает вероятность переноса этого материала (песчано-глинистые отложения) потоком каньона.

В зарубежной литературе активно обсуждается вопрос влияния климата на характер донных осадков [Mauffrey et al., 2017]. Исследования, проведенные на Байкале [Evangelinos et al., 2017; Nelson et al., 1995], показали, что в течение позднеплейстоценовых гляциалов

скорость роста большинства турбидитных систем на Байкале была больше, чем в межгляциальное время, потому что более низкий уровень моря и пониженный базис уровня речного дренажа увеличивали осадочный поток и это способствовало переносу больших по размеру обломков. По мере развития более теплого голоценового климата, исчезновения ледников и роста лесов роль турбидитов значительно уменьшилась.

Колебания климата в настоящее время также могут повлиять на динамику и характер переносимого материала. Озеро Байкал уже столкнулось с влиянием недавнего потепления 1950-х годов, которое привело к лимнологическим и экосистемным изменениям [Hampton et al., 2008].

Весьма важной причиной массового поступления грубых отложений (в том числе и техногенных) могут быть штормы, которые приводят к возникновению гравитационных потоков от береговой линии в глубь бассейна. Эти потоки генерируются развитием избыточного порового давления воды во время штормов, что вызывает разжижение отложений, находящихся в начале каньона. Крутые верховья каньонов способствуют транспортировке сжиженного слоя осадка вниз по каньону, что вызывает быстрое формирование гравитационного потока осадка [Puig et al., 2004]. Помимо мобилизации и сбрасывания крупных частиц с литорали в верховья каньона, турбулентность, создаваемая штормовыми волнами, образует мутный поток, который входит в каньон и переносит подхваченный материал. Б.Ф. Лут с соавторами [Lut et al., 1984] на примере каньонов Северного Байкала определили условия

переноса материала в верховьях каньонов при разных волнениях. Во время сильного шторма ими наблюдалось более обильное поступление как взвешенных, так и влекомых наносов в верховье каньона и перенос их по руслу на глубину. На одном из участков они зафиксировали, что практически весь материал, переносимый вдольбереговым потоком, перехватывается верховьями находящегося здесь подводного каньона.

Важным «борцом» за сохранение уникальной чистоты байкальских вод являются так называемые природные геохимические барьеры, которые располагаются на участках изменения факторов миграции и обуславливаются природными особенностями конкретного участка биосферы [Perelman, 1975]. В литоральной части Байкала возле устьев всех крупных рек существуют геохимические барьеры, где оседают из речной воды и осаждаются в виде взвеси многие неорганические токсиканты [Lake Baikal..., 2005]. Большую роль на озере играют биогеохимические барьеры, связанные с накоплением химических элементов растительными и животными организмами. Важными и уже хорошо известными очистителями воды Байкала от взвешенных веществ являются известные эндемичные организмы – рачок эпишура, губки и другие. В результате химических процессов избыток веществ, приносимых поверхностным стоком рек, существенно не изменяет состав байкальской воды, а химические элементы увлекаются в донные отложения в виде минеральных фаз типа гидрослюды, а также в виде нерастворимых в воде минералов, которые в незначительном количестве могут оседать на дно Байкала [Kashik et al., 1996].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в работе данные по Шаманскому и Слюдянскому каньонам показывают, что подводные долины на Байкале могут играть большую роль в переносе обломочного материала от литорали до абиссальной поверхности озера, формируя в значительной степени осадочный покров донной поверхности.

Роль каньонов как транзитеров рыхлого материала зависит от ряда факторов.

1. Транспортирующая роль долин каньонов в эпохи оледенений позднего плейстоцена резко возросла, что приводило к формированию мощных прослоев песчаных турбидитов в донных разрезах. Современные колебания климата также могут влиять на динамику переноса и характер осадконакопления.

2. Активная сеймотектоника Байкальской впадины инициирует обрушение и сползание фрагментов подводных склонов, формирование критически рыхлых масс в их верховьях и создание гравитационных потоков, которые способны перенести огромные массы материала (в том числе техногенного) в глубь озерного бассейна. В верховьях и по бортам долин многих байкальских каньонов зафиксированы многочисленные следы обрушений, оползаний и просадок, образование которых провоцировалось землетрясениями.

3. Причиной массового поступления грубых отложений в долины каньонов могут быть штормы (характерные для Байкала), которые приводят к возникновению гравитационных потоков от береговой линии в глубь бассейна.

В дельтах наиболее крупных притоков озера наносы в большей части задерживаются на геохимических барьерах и лишь частично поступают в донные осадки Байкала.

Современное интенсивное освоение береговой полосы озера приводит к накоплению значительного количества отходов на пляжах, в литоральной зоне, которые в дальнейшем вовлекаются гидродинамическими процессами озера в оборот. Отсутствие статистически достоверных данных о роли склоновых процессов и долин каньонов в переносе этих отходов в глубь озера оставляет открытым вопрос об уровне и глубине распространения техногенного загрязнения акватории водного бассейна.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Both authors made a significant contribution to this article, read and approved the final manuscript.

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

Both authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Antsiferov S.M., Kosyan R.D., 1977. Study of Motion of Suspended Detrital Material in the Upper Shelf Seaward of the Bars. *Oceanology* 17 (3), 497–505 (in Russian) [Анциферов С.М., Косьян Р.Д. Исследования движения взвешенного обломочного материала в верхней части шельфа мористее валов // *Океанология*. 1977. Т. 17. № 3. С. 497–505].

Brekhovskikh L.M., Godin O.A., 2007. *Acoustics in Inhomogeneous Media*. Vol. 1. Nauka, Moscow, 443 p. (in Russian) [Бреховских Л.М., Годин О.А. *Акустика неоднородных сред*. М.: Наука, 2007. Т. 1. 443 с.].

Canals M., Company J.B., Martin D., Sanchez-Vidal A., Ramírez-Llodrà E., 2013. Integrated Study of Mediterranean Deep Canyons: Novel Results and Future Challenges. *Progress in Oceanography* 118, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.09.004>.

De Batist M., Canals M., Sherstyankin P., Alekseev S. & the INTAS Project 99-1669 Team, 2002. A New Bathymetric Map of Lake Baikal. Available from: <http://www.lin.irk.ru/intas/index.htm> (Last Accessed November 12, 2020).

De Moustier C., 1986. Beyond Bathymetry: Mapping Acoustic Backscattering from the Deep Seafloor with Sea

Beam. The Journal of the Acoustical Society of America 79 (2), 316. <https://doi.org/10.1121/1.393570>.

Evangelinos D., Nelson C., Escutia C., Batist M., Khlystov O.M., 2017. Late Quaternary Climatic Control of Lake Baikal (Russia) Turbidite Systems: Implications for Turbidite Systems Worldwide. *Geology* 45 (2), 179–182. <https://doi.org/10.1130/G38163.1>.

Gaida T.C., Mohammadloo T.H., Snellen M., Simons D.G., 2020. Mapping the Seabed and Shallow Subsurface with Multi-Frequency Multibeam Echosounders. *Remote Sens* 12 (1), 52. <https://doi.org/10.3390/rs12010052>.

Goldyrev G.S., Vykhristyuk L.A., Laxo F.I., Shimaraeva M.K., 1979. Compositional and Textural Features of the Upper Sedimentary Unit in the Baikal Basin. In: Abstracts of the V All-Russian Symposium. Irkutsk, p. 37–42 (in Russian) [Голдырев Г.С., Выхристюк Л.А., Лазо Ф.И., Шимараева М.К. Особенности состава и строения верхней части осадочной толщи в котловине Байкала // V Всесоюзный симпозиум: Тезисы докладов. Иркутск, 1979. С. 37–42].

Gubin N.A., Grigorev K.A., Poletaev A.S., Chensky A.G., 2021. Combined Hydroacoustic Research of Lake Baikal. *Journal of Physics: Conference Series* 1728, 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1728/1/012005>.

Gubin N.A., Kononov E.E., Poletaev A.S., Chensky A.G., 2022. Underwater Relief and Sediments in the Area of the St. Petersburg Mud Volcano (Lake Baikal). *Geography and Natural Resources* 3, 70–76 (in Russian) [Губин Н.А., Кононов Е.Е., Полетаев А.С., Ченский А.Г. Подводный рельеф и осадки в районе грязевого вулкана Санкт-Петербург (озеро Байкал) // География и природные ресурсы. 2022. № 3. С. 70–76]. <https://doi.org/10.15372/GIPR20220308>.

Hampton S.E., Izmet'eva L.R., Moore M.V., Katz S.L., Dennis B., Silow E.A., 2008. Sixty Years of Environmental Change in the World's Largest Freshwater Lake – Lake Baikal, Siberia. *Global Change Biology* 14 (8), 1947–1958. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x>.

Harris P.T., Whiteway T., 2011. Global Distribution of Large Submarine Canyons: Geomorphic Differences between Active and Passive Continental Margins. *Marine Geology* 285 (1–4), 69–86. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.05.008>.

Jackson D.R., Richardson M.D., 2007. High-Frequency Seafloor Acoustics. The Underwater Acoustics Series. Springer, New York, 634 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36945-7>.

Karabanov E.B., Fialkov V.A., 1987. Underwater Canyons of the Baikal. Novosibirsk, Nauka, 104 p. (in Russian) [Карabanov Е.Б., Фиалков В.А. Подводные каньоны Байкала. Новосибирск: Наука, 1987. 104 с.].

Kashik S.A., Lomonosova T.K., Mazilov V.N., 1996. Mineral Formation Processes and Chemical Balance in Lake Baikal. In: *Lithosphere of Central Asia*. Nauka, Novosibirsk, p. 93–98 (in Russian) [Кашик С.А., Ломоносова Т.К., Мазиллов В.Н. Процессы минералообразования и химический баланс вещества в оз. Байкал // Литосфера Центральной Азии. Новосибирск: Наука, 1996. С. 93–98].

Khlystov O.M., Kononov E.E., Kazakov A.V., Khabuev A.V., Minami H., Gubin N.A., Chenskii A.G., 2018. New Evidence on the Relief of the Southern Underwater Slope in the South Baikal Basin. *Geography and Natural Resources* 39, 33–38. <https://doi.org/10.1134/S1875372818010055>.

Kononov E.E., 2021. The Bottom Relief Features of the Basins of Lake Baikal. *Geography and Natural Resources* 42, 337–344. <https://doi.org/10.1134/S1875372821040090>.

Kononov E., Khlystov O., De Batist M., Naudts L., Kazakov A., Minami H., Hachikubo A., 2021 (in press). Sublacustrine Canyons of the South and Central Basins of Lake Baikal as a Result of Interaction of Tectonic, Lithological and Climatic Factors. *Quaternary International*. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.10.009>.

Kononov E.E., Khlystov O.M., Kazakov A.V., Khabuev A.V., De Batist M., Naudts L., Minami H., 2019a. The Lake Floor Morphology of the Southern Baikal Rift Basin as a Result of Holocene and Late Pleistocene Seismogenic and Gravitational Processes. *Quaternary International* 524, 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.01.038>.

Kononov E.E., Khlystov O.M., Minami H., Kazakov A.V., Chenskii A.G., Naudts L., 2019b. Canyons of the Eastern Shore of Southern Baikal: Morphology and Genesis. *Geography and Natural Resources* 40, 37–45. <https://doi.org/10.1134/S1875372819010062>.

Kushal K.T., Tyce R., Clay C.S., 1995. Interpretation of Sea Beam Backscatter Data Collected at the Laurentian Fan off Nova Scotia Using Acoustic Backscatter Theory. *The Journal of the Acoustical Society of America* 97 (3), 1545. <https://doi.org/10.1121/1.412094>.

Lake Baikal. Past. Present. Future. Atlas, 2005. East-Siberian Aerogeodetic Enterprise, Irkutsk, 117 p. (in Russian) [Озеро Байкал. Прошлое. Настоящее. Будущее: Атлас. Иркутск: Восточно-Сибирское аэрогеодезическое предприятие, 2005. 117 с.].

Le Dantec N., Babonneau N., Franzetti M., Delacourt C., Akhtman Y., Ayurzhanayev A., Le Roy P., 2016. Morphological Analysis of the Upper Reaches of the Kukuy Canyon Derived from Shallow Bathymetry. In: D. Karthe, S. Chalov, N. Kasimov, M. Kappas (Eds), *Water and Environment in the Selenga-Baikal Basin: International Research Cooperation for an Ecoregion of Global Relevance*. Ibibdem Press, Hannover, p. 179–190.

Lut B.F., Vlasova L.K., Fialkov V.A., Leshchikov F.N., Mi-roshnichenko A.P., Galkin V.I., Karabanov E.B. et al., 1984. *Lithodynamics and Sedimentation in the North Baikal*. Nauka, Novosibirsk, 290 p. (in Russian) [Лут Б.Ф., Власова Л.К., Фиалков В.А., Лещиков Ф.Н., Мирошниченко А.П., Галкин В.И., Карabanov Е.Б. и др. Литодинамика и осадкообразование Северного Байкала. Новосибирск: Наука, 1984. 290 с.].

Mauffrey M.-A., Urgeles R., Berne S., Canning J., 2017. Development of Submarine Canyon after the Mid-Pleistocene Transition on the Ebro Margin, NW Mediterranean: The Role of Fluvial Connections. *Quaternary Science Reviews* 158, 77–93. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.01.006>.

Mohrig D., Marr J.G., 2003. Constraining the Efficiency of Turbidity Current Generation from Submarine Debris Flows and Slides Using Laboratory Experiments. *Marine and Petroleum Geology* 20 (6–8), 883–899. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2003.03.002>.

Nelson C.H., Karabanov E.B., Colman S.M., 1995. Late Quaternary Turbidite Systems in Lake Baikal, Russia. In: K.T. Pickering, R.N. Hiscott, N.H. Kenyon, F. Ricci Lucchi, R.D.A. Smith (Eds), *Atlas of Deep Water Environments: Architectural Style in Turbidite Systems*. Springer, Dordrecht, p. 29–33. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1234-5_7.

Och L.M., Müller B., Wichser A., Ulrich A., Vologina E.G., Sturm M., 2014. Rare Earth Elements in the Sediments of Lake Baikal. *Chemical Geology* 376, 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.03.018>.

Patrikeeva G.I., 1959. Bottom Sediments of the Small Sea. *Proceedings of the Baikal Limnological Station*. Vol. 17. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow–Leningrad, p. 205–254 (in Russian) [Патрикеева Г.И. Донные отложения Малого моря // Труды Байкальской лимнологической станции. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. 17. С. 205–254].

Perelman A.I., 1975. *Geochemistry of Landscape*. Vysshaja Shkola, Moscow, 342 p. (in Russian) [Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.].

Puig P., Ogston A.S., Mullenbach B.L., Nittrouer C.A., Parsons J.D., Sternberg R.W., 2004. Storm-Induced Sediment Gravity Flows at the Head of the Eel Submarine Canyon,

Northern California Margin. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 109, C3. <https://doi.org/10.1029/2003JC001918>.

Rusinek O.T., Ufimtsev G.F., Fialkov V.A., 2009. *The Baikal Course. A Scientific Tour of the Baikal*. GEO, Novosibirsk, 187 p. (in Russian) [Русинек О.Т., Уфимцев Г.Ф., Фиалков В.А. Байкальский ход: Научная экскурсия по Байкалу. Новосибирск: Гео, 2009. 187 с.].

Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M., Moore M.V., Belykh O.I., Malnik V.V., Sakirko M.V., Shirokaya A.A. et al., 2016. Rapid Ecological Change in the Coastal Zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the Site of the World's Greatest Freshwater Biodiversity in Danger? *Journal of Great Lakes Research* 42 (3), 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>.

Vologina E.G., Sturm M., 2009. Types of Holocene Deposits and Regional Pattern of Sedimentation in Lake Baikal. *Russian Geology and Geophysics* 50 (8), 722–727. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.12.012>.

Vologina E.G., Sturm M., Radziminovich Y.B., 2021. Traces of High Seismic Activity in the Uppermost Sediments of Lake Baikal, Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3), 544–562 (in Russian) [Вологина Е.Г., Штурм М., Радзиминович Я.Б. Следы высокой сейсмической активности в поверхностных отложениях озера Байкал, Сибирь // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3. С. 544–562]. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0538>.