

ДИНАМИКА ОСЕДАНИЯ И ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ ПРИОЗЕРНОЙ ЧАСТИ ДЕЛЬТЫ Р. РИТЫ В ЗОНЕ РАЗРЫВОВ НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ОЗ. БАЙКАЛ

О. В. Лунина*¹  и А. А. Гладков^{1,2} 

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

²ГАУ ДО ИО «Центр развития дополнительного образования детей», Иркутск, Россия

* **Контакт:** Оксана Викторовна Лунина, lounina@crust.irk.ru

В связи с активным освоением речных дельт их оседание является одной из ключевых проблем жизнедеятельности человека. Процесс закономерный и зависит от многих факторов, влияние которых еще недостаточно изучено. Нами проведено исследование, цель которого заключалась в выявлении изменений земной поверхности приозерной части дельты р. Риты в зоне ранее выявленных разрывов на северо-западном побережье оз. Байкал. Оценка топографических изменений выполнялась путем расчета разницы между разновременными цифровыми моделями местности (ЦММ), полученными на двух локальных участках по данным беспилотной аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения в 2020 и 2021 гг. В результате установлено, что оседание приозерной части дельты за 11 месяцев и 19 дней произошло в среднем на 5–10 см. Эти значения ассоциируются с естественным уплотнением осадков. В местах их накопления агградация происходит на аналогичные величины, уравновешивая баланс отложений. В выходах сейсмогравитационных нарушений в отсутствие наносов просадки достигли 33–37 см, что указывает на активные эндогенные и экзогенные процессы в зоне Кочериковского разлома. Наибольшие отрицательные и положительные вертикальные изменения рельефа до 40 см произошли в пределах пляжа и связаны с волноприбойной деятельностью. Самая крайняя заболоченная часть мыса Рытого испытала максимальное опускание за год. Наибольшее накопление аллювия произошло на южном участке дельты р. Риты в понижении, выраженном в рельефе местности и совпадающим с зоной современных разрывов, а также в аккумулятивном потоке, перекрывающем зону поверхностных нарушений. За исключением этой части, несмотря на интенсивные наносы, разрывы хорошо проявлены на ЦММ, а значит, продолжают развиваться. Сравнение разновременных ЦММ путем вычитания высотных отметок для каждого узла (пикселя) модели является перспективным и недорогим методом для целей мониторинга деформаций земной поверхности.

Ключевые слова: зона разрывов, дельта, оседание, беспилотная аэрофотосъемка, цифровая модель местности, Байкал

Цитирование: Лунина, О. В. и А. А. Гладков Динамика оседания и осадконакопления приозерной части дельты р. Риты в зоне разрывов на северо-западном побережье оз. Байкал // Russian Journal of Earth Sciences. — 2023. — Т. 23. — ES6006. — DOI: 10.2205/2023es000874 — EDN: НТСАВО

<https://elibrary.ru/htcabo>

Получено: 30 июня 2023 г.

Принято: 22 сентября 2023 г.

Опубликовано: 30 декабря 2023 г.



© 2023. Коллектив авторов.

1. Введение

Многие крупные речные дельты Земли сильно заселены и при этом испытывают интенсивное оседание, достигающее 5–10 см в год [Schmidt, 2015]. Оседание является закономерным и зависит от многих факторов, включающих накопление наносов, уплотнение осадков, их нагрузку на нижележащие толщи, уровень воды в водоеме, тектонику и антропогенную деятельность [Higgins et al., 2014; Loucks, 2019; Tessler et al., 2018]. Для изучения скорости этого процесса успешно используют технологии InSAR и LiDAR,

которые позволяют оценивать изменения деформационного поля земной коры [Hu et al., 2022; Yang et al., 2022; Zhong et al., 2022]. В указанных работах роль разрывных нарушений специально не рассматривается, хотя есть публикации, демонстрирующие выделение линейных зон активных деформаций по данным дифференциальной РСА-интерферометрии [Лебедева и др., 2013]. Исходя из общих представлений, разрывы должны существенно влиять на локализацию процессов оседания и осадконакопления, что важно при оценке геологических опасностей территорий.

Учитывая остроту проблемы, связанной с жизнедеятельностью человека и поиском новых методов мониторинга окружающей среды, нами проведено исследование, цель которого заключалась в выявлении изменений земной поверхности приозерной части дельты р. Риты в зоне ранее выявленных сейсмогравитационных разрывов на северо-западном побережье оз. Байкал. Работа актуальна как в части развития побережий уникального озера, так и с точки зрения изучения особенностей современной динамики оседания и осадконакопления в дельтах горных рек.

Дельта р. Риты, образующая мыс Рытый, расположена на территории Байкало-Ленского заповедника, что исключает антропогенное воздействие на ее развитие, рассматриваемое во многих случаях ведущим фактором оседания крупных дельт. Выбор нашего объекта исследований обусловлен тем, что в 2019 г. в приозерной части дельты при ее аэрофотосъемке была случайно обнаружена зона разрывов общей протяженностью 2,9 км (рис. 1). Система нарушений четко локализована и разбивается на два сегмента – субмеридиональный и северо-восточный. Разрывы расположены в 30–150 м от берега оз. Байкал и представляют собой уступы высотой от 0,2 до 1,84 м, согласно измерениям 2019 г. Более подробную информацию о строении зоны разрывов, доказательствах ее связи с предшествующей тектонической структурой и инициирующим землетрясением 13.08.1962 г. с $M = 5,2$ можно найти в работе [Лунина и Гладков, 2022]. Здесь важно отметить, что обнаруженные деформации находятся в зоне Кочериковского разлома, активность которого подтверждается палеосейсмогенными разрывами, простирающимися в северо-восточном направлении на склонах Байкальского хребта и в тыловой части дельты р. Риты. В ~ 16 км на восток от мыса Рытого проходит предполагаемый меридиональный разлом, а в 10 км на юг в оз. Байкал фиксируется вытягивание изобат в направлении С–Ю прямо на субмеридиональный сегмент разрывов в дельте р. Риты. В связи с этим был сделан вывод, что несмотря на визуальное совпадение простираения современной зоны нарушений с береговой линией мыса, ее образование предопределено тектоникой. Существенную роль при этом несомненно сыграли гравитационные силы, усилившие процесс вторичного разрывообразования при сейсмическом сотрясении.

После неожиданной находки зоны современных разрывов в приозерной части дельты р. Риты на северо-западном побережье оз. Байкал возник новый не менее важный вопрос, а именно, как сейчас происходит развитие зоны в пространстве и времени. Отвечая на него, мы затронули более широкую проблему динамики оседания и осадконакопления приозерной части дельт горных рек.

2. Методика исследований

Для оценки топографических изменений земной поверхности в приозерной части дельты р. Риты нами использован расчет разницы между разновременными цифровыми моделями местности, полученными из данных беспилотной аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения. Аналогичный подход использован при изучении ледников и оползней в работах [Bearzot et al., 2022; Rossini et al., 2018; Valkaniotis et al., 2018].

Для исследований выбрано два участка в пределах субмеридионального и северо-восточного сегментов современной зоны разрывов (рис. 1), где в 2020 и 2021 гг. проведены повторные аэрофотосъемочные работы на более низкой высоте по сравнению с 2019 г. (табл. 1). В 2020 г. съемка выполнена с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Phantom 4 Pro V2.0, в 2021 г. – DJI Phantom 4 RTK. Оба коптера оснащены камерами одной модели с одинаковыми техническими характеристиками.

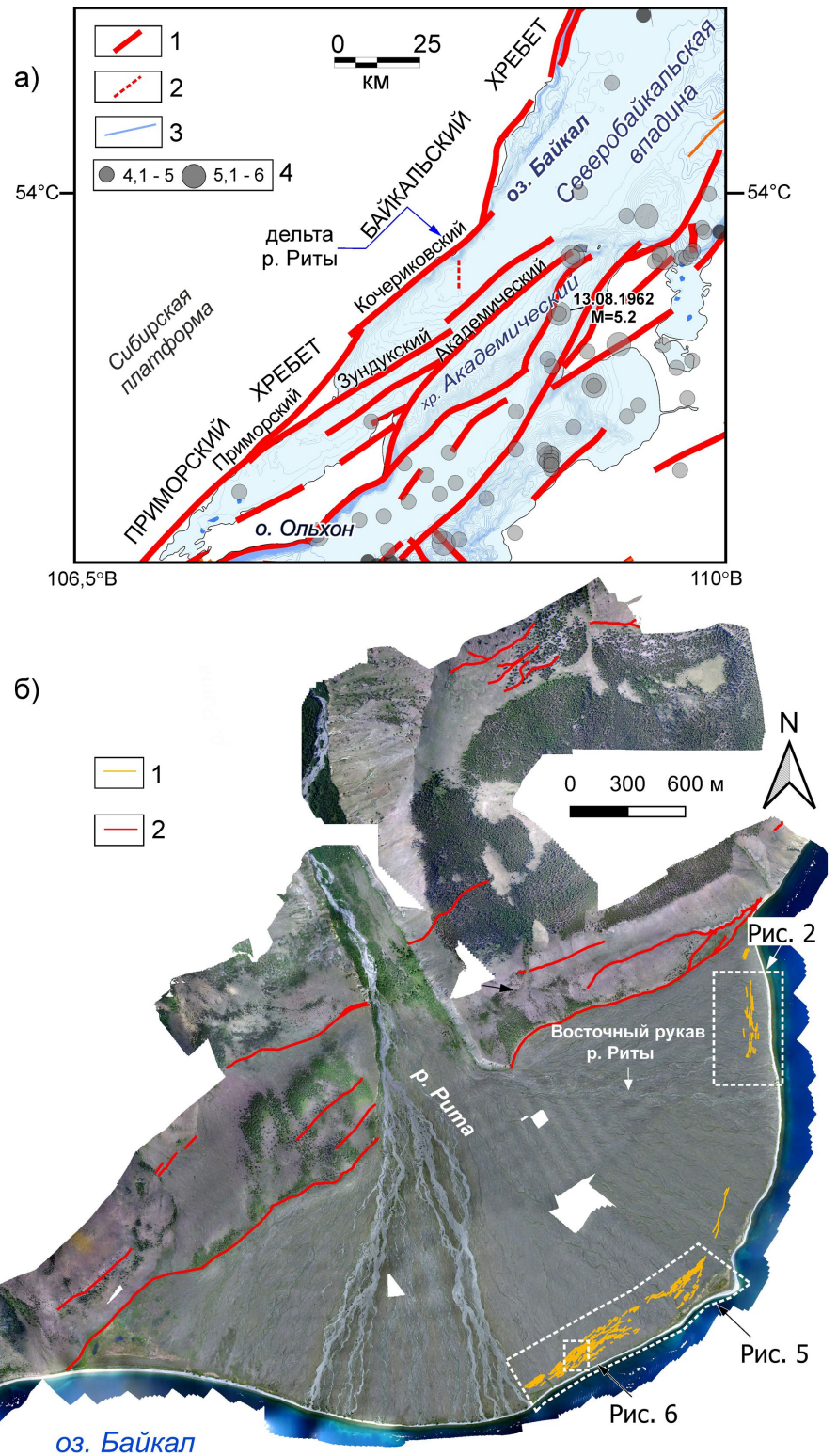


Рис. 1. Местоположение дельты р. Риты на схеме сейсмоактивных разломов северной части оз. Байкал (а) и поверхностных разрывов на ортофотоплане дельты р. Риты (б). Условные обозначения: а) 1 – сейсмоактивный разлом; 2 – упомянутый в тексте предполагаемый разлом; 3 – изобаты; 4 – землетрясения с $M > 4$; б) 1 – современный сейсмогравитационный разрыв; 2 – палеосейсмогенный разрыв.

Съемка проводилась в автоматическом режиме по полетным заданиям на одной и той же высоте (30 м), чтобы добиться идентичности пространственного разрешения, т.е. размера пикселя на местности.

По результатам работ по стандартной методике в программе «Agisoft Metashape» [Agisoft LLC, 2021] были построены ортофотопланы и цифровые модели местности (ЦММ), характеристики которых приведены в табл. 1. В 2021 году геодезическая привязка осуществлялась с помощью модуля RTK БПЛА и базовой станции D-RTK2, установленной в непосредственной близости от исследуемых участков. Для того, чтобы произвести сравнение ЦММ путем вычисления разницы высотных отметок, модель 2020 года была перепривязана по характерным стабильным на местности точкам (маркерам), выделенным на обеих моделях и ортофотопланах. Для проведения этой процедуры для субмеридионального участка был выделен 131 маркер, для северо-восточного – 200. В итоге геодезическая привязка ЦММ 2020 г. была скорректирована по координатам и высотам маркеров, взятым из модели 2021 г. Перед вычитанием разновременные ЦММ и ортофотопланы были приведены к одному пространственному разрешению (табл. 1). Последние использовались для визуального контроля соответствия ЦММ. После проведения процедур с помощью встроенного в программу «Agisoft Metashape» инструмента «рассчитать разницу» для каждого узла (пикселя) модели был выполнен расчет разницы между высотными отметками (из значений высотных характеристик 2021 г. были вычтены значения высотных характеристик 2020 г.). Такой подход позволил выявить относительные изменения высотных отметок внутри участка исследования и в то же время избежать проблем, связанных с погрешностью измерения координат.

Таблица 1. Характеристики ортофотопланов и ЦММ для участков аэрофотосъемки

Дата съемки	Место / высота съемки	Пространственное разрешение, см/пикс		Площадь, км ²	Количество использованных фотографий
		ортофотоплан	ЦММ		
30.06.2019 01.07.2019 05.07.2019	Дельта р. Риты и прилегающая площадь / 100–130 м	6–10	10–20	11,07	7000
03.07.2020 22.06.2021	Субмеридиональный сегмент зоны разрывов в приозерной части дельты / 30 м	1,67	1,67	0,482	6390
03.07.2020 21.06.2021	СВ сегмент зоны разрывов в приозерной части дельты / 30 м	3,29	3,29	0,569	7131 4890

3. Результаты расчетов изменений земной поверхности

3.1. Субмеридиональный сегмент зоны разрывов

Субмеридиональный сегмент зоны разрывов простирается в северном секторе мыса Рытый, где в средней части полностью уничтожен восточным рукавом р. Риты с хорошо проработанными руслами глубиной в отдельных местах до 2,4 м (рис. 1). В северной части этого сегмента разрывы особенно отчетливо выражены на земной поверхности (рис. 2а, б и 3). Максимальные вертикальные смещения по ним колеблются от 0,33 м до 1,14 м, видимые длины разрывов – от 17,45 м до 129,6 м. В южной части субмеридионального сегмента два нарушения длиной 218 м и 43,28 м с градиентами исходных поверхностей 1,84 и 0,76 м, соответственно, плавно переходят в северо-восточный сегмент линейной зоны деформаций (рис. 1).

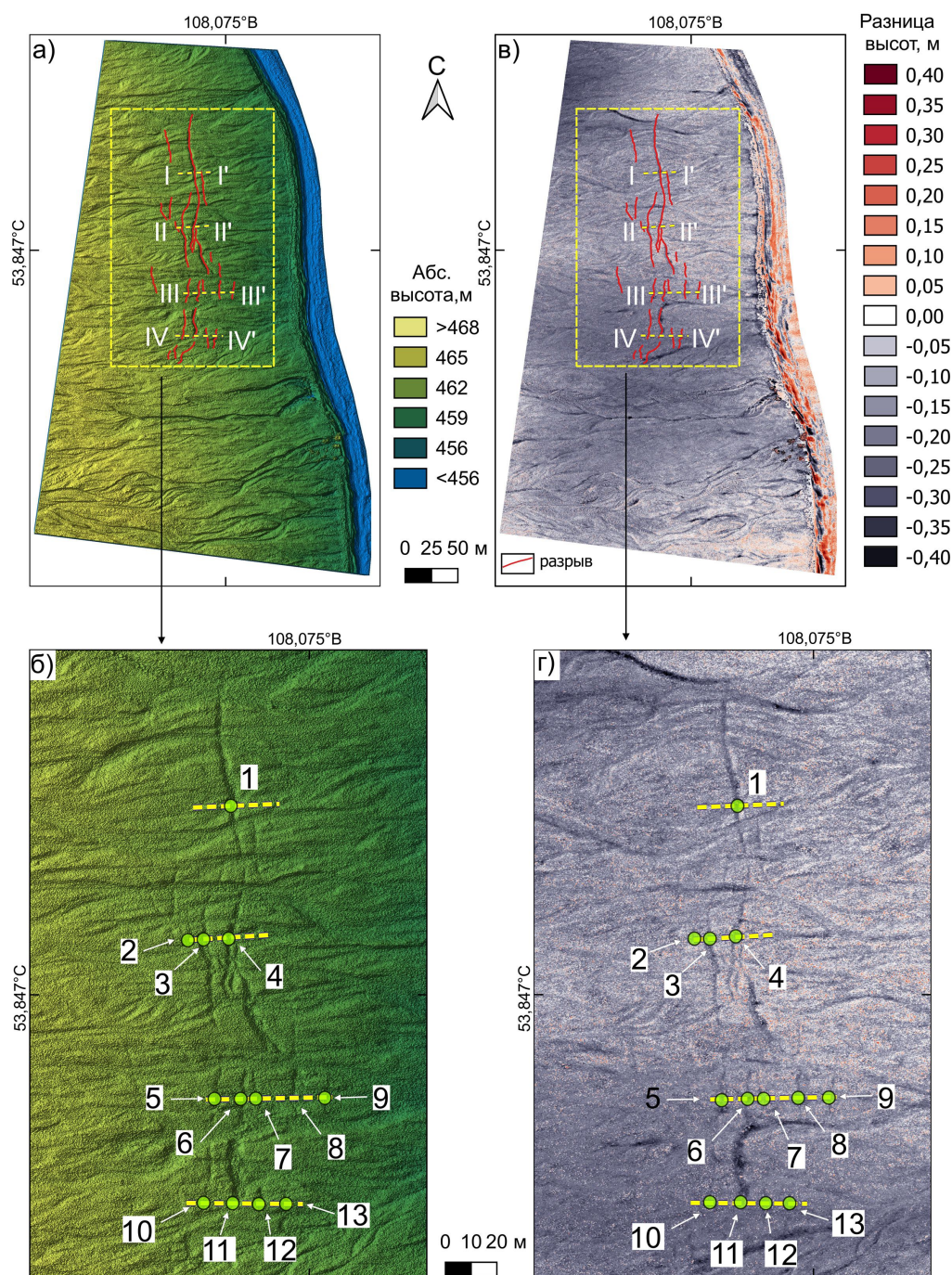
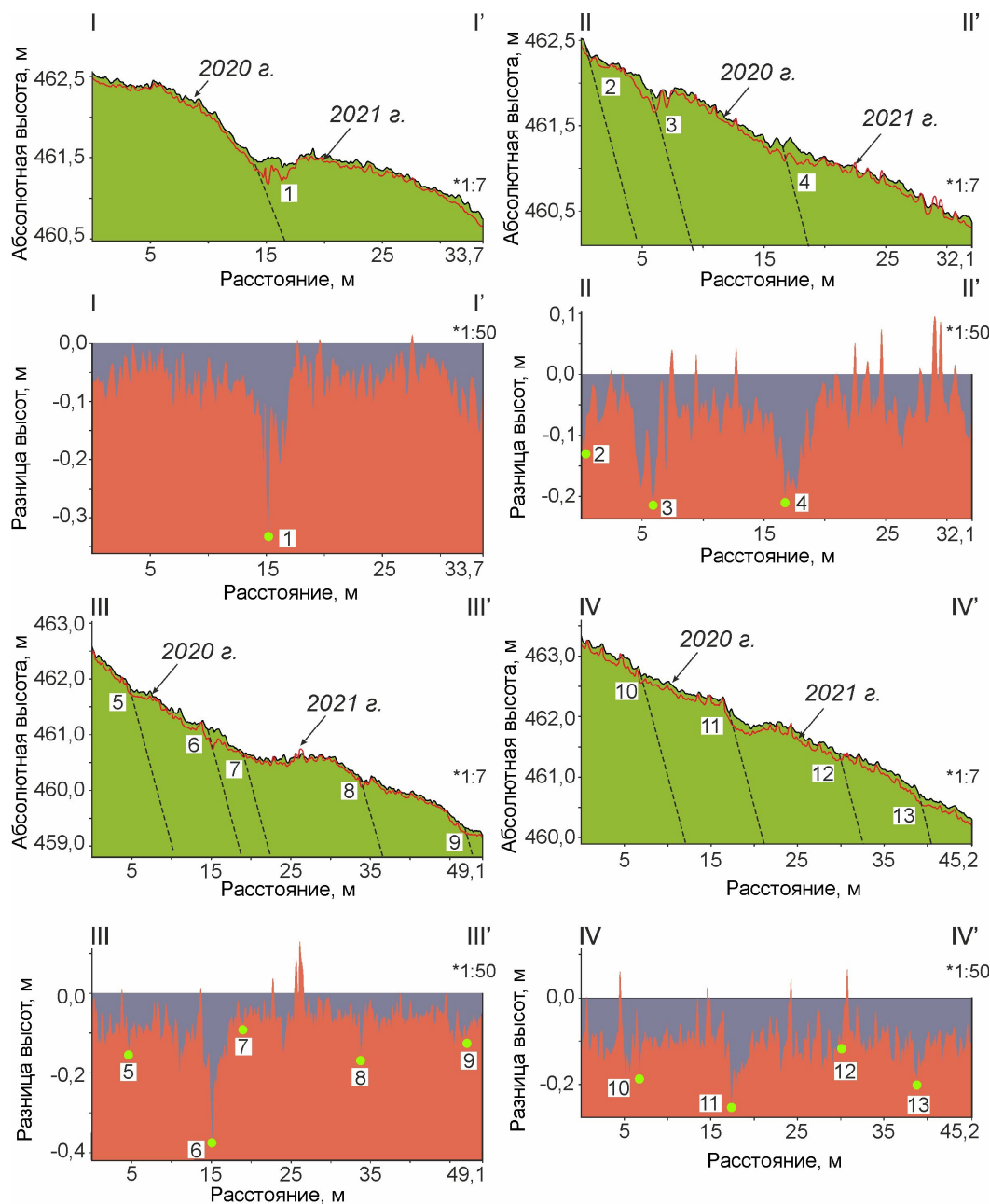


Рис. 2. ЦММ северного локального участка дельты р. Риты (а–б) и вертикальное изменение земной поверхности за период с 03.07.2020 по 22.06.2021 гг. (в–г). Римскими цифрами обозначены номера профилей, показанные на рис. 3, арабскими цифрами и зелеными кружками – выходы разрывов (показаны красными линиями на «а» и «в»).

Расчет разницы между двумя ЦММ показывает, что большая часть северной локальной площади дельты р. Риты опустилась в среднем на 5–10 см (рис. 2в, г и 3). В зоне разрывов субмеридионального простирания опускание проявилось еще больше, а просадки в линейных рвах в отдельных местах достигли 33–37 см, что позволило



*Соотношение горизонтального и вертикального масштабов

Рис. 3. Профили через современные сейсмогравитационные разрывы на северном участке, построенные по ЦММ, отражающим рельеф (зеленые) и разницу высот за период с 03.07.2020 по 22.06.2021 гг. (оранжевые). Римскими цифрами обозначены номера профилей, показанных на рис. 2, арабскими цифрами и зелеными кружками – выходы разрывов. Пунктир – условное падение разрыва.

идентифицировать нарушения даже на модели-разнице (рис. 2г). Некоторые временные, на момент съемки сухие, русла также локально углубились за счет эрозии. Отдельные аллювиальные обломки на поверхности дельты р. Риты были принесены ее водными потоками, но наибольшее накопление осадков до 40 см произошло в береговой части, что связано в основном с геологической деятельностью волн оз. Байкал.

Общее опускание и неравномерность просадок в месте выхода разрывов хорошо демонстрируются на поперечных профилях I-I', II-II', III-III', IV-IV' (рис. 2в и 3). На фоне сравнительно равномерного оседания дельты по всем разрезам, которое, ве-

роятнее всего, обусловлено уплотнением осадков под собственным весом, в выходах разрывов на поверхность происходит скачок в разнице высот рельефа. Характерно, что одиночные разрывы, как на профиле I–I', имеют изначально большую вертикальную амплитуду смещения (рис. 3) и тенденцию к увеличению величины просадки. Группирующиеся субпараллельные разрывы с изначально меньшими смещениями предполагают и меньшие изменения в высотах земной поверхности, хотя отдельные малоамплитудные нарушения, например, № 6 на профиле III–III', показывают значительную разницу высот (37 см).

3.2. Северо-восточный сегмент зоны разрывов

Северо-восточный сегмент зоны представляет собой более распределенную систему нарушений длиной от 8,16 до 210 м (рис. 1 и 4). Максимально зафиксированные вертикальные смещения по ним изменяются от 0,2 до 1,14 м. На одном из участков зона частично размыта или перекрыта осадками, из-за чего там сохранились только фрагменты разрывов. В целом они представлены менее контрастно на местности из-за меньших амплитуд смещений. Многие нарушения не имеют абсолютного согласия с простираем береговой линии. Правостороннее смещение одного из крупных сухих русел, возможно, мнимое, так как подобных сдвиговых смещений сопоставимой величины на ортофотоплане и ЦММ не наблюдается. В какой-то момент вода временного водотока могла устремиться по разрыву с большим вертикальным и раздвиговым смещением, чем на соседнем сегменте.

Величина опускания дельты р. Риты на южном участке также, как и на северном, в среднем изменилась на 5–10 см, что свидетельствует в целом о стабильной величине скорости оседания, связанной с уплотнением отложений и/или региональными тектоническими процессами (рис. 5). Однако местами она достигла 20 см, а в отдельных редких точках даже 30 см. В отличие от северного участка, здесь идет интенсивный снос осадков в пониженные части, поэтому большинство разрывов на «модели – разнице» подчеркиваются положительными значениями (рис. 5б, в), что связано с заполнением рвов. При этом, увеличение мощности грубообломочных отложений происходит примерно на те же величины (см. профиль V–V' на рис. 5а). Поперечный разрез VI–VI' через всю зону в наиболее широкой ее части показывает, что рвы некоторых разрывов на фоне их заполнения продуктами сноса продолжают просаживаться (рис. 6), но в целом этот процесс, как и осадконакопление, весьма неравномерный в пространстве.

Сопоставление гипсометрического профиля (рис. 6в) и профиля, демонстрирующего разницу высот за год VI–VI' (рис. 6г), наглядно показывает, что уменьшение высоты рельефа происходит закономерно за счет переноса осадков в пониженные участки земной поверхности. При этом на графике разницы высот (рис. 6г) даже визуально видно, что отрицательных значений больше, чем положительных, что свидетельствует о том, что определенный вклад в оседание приозерной части дельты р. Риты вносит естественное уплотнение осадков и процессы разрывообразования. Это подтверждается результатами расчетов изменений земной поверхности и наблюдениями на северном участке дельты р. Риты, в месте распространения субмеридиональных разрывов, где современное осадконакопление практически отсутствует.

Профили VII–VII' и VIII–VIII' построены через единичные разрывы в местах отрицательных (VII–VII') и положительных изменений (VIII–VIII') рельефа (рис. 7). Первый из них показывает оседание дельты в месте, где не было заметного сноса осадков, что видно по следу положительных значений (рис. 7ж). Второй демонстрирует погребение висячего крыла разрыва под новыми осадками.

4. Обсуждение результатов

Изучение молодых движений берегов оз. Байкал начато более 100 лет назад А. П. Орловым [1870] и И. Д. Черским [1886], а обобщение работ их последователей было сделано в 1961 г. Н. П. Ладохин и Е. К. Гречищев [1961] пришли к заключению, что выводы предшественников, основанные на применении геоморфологических ме-

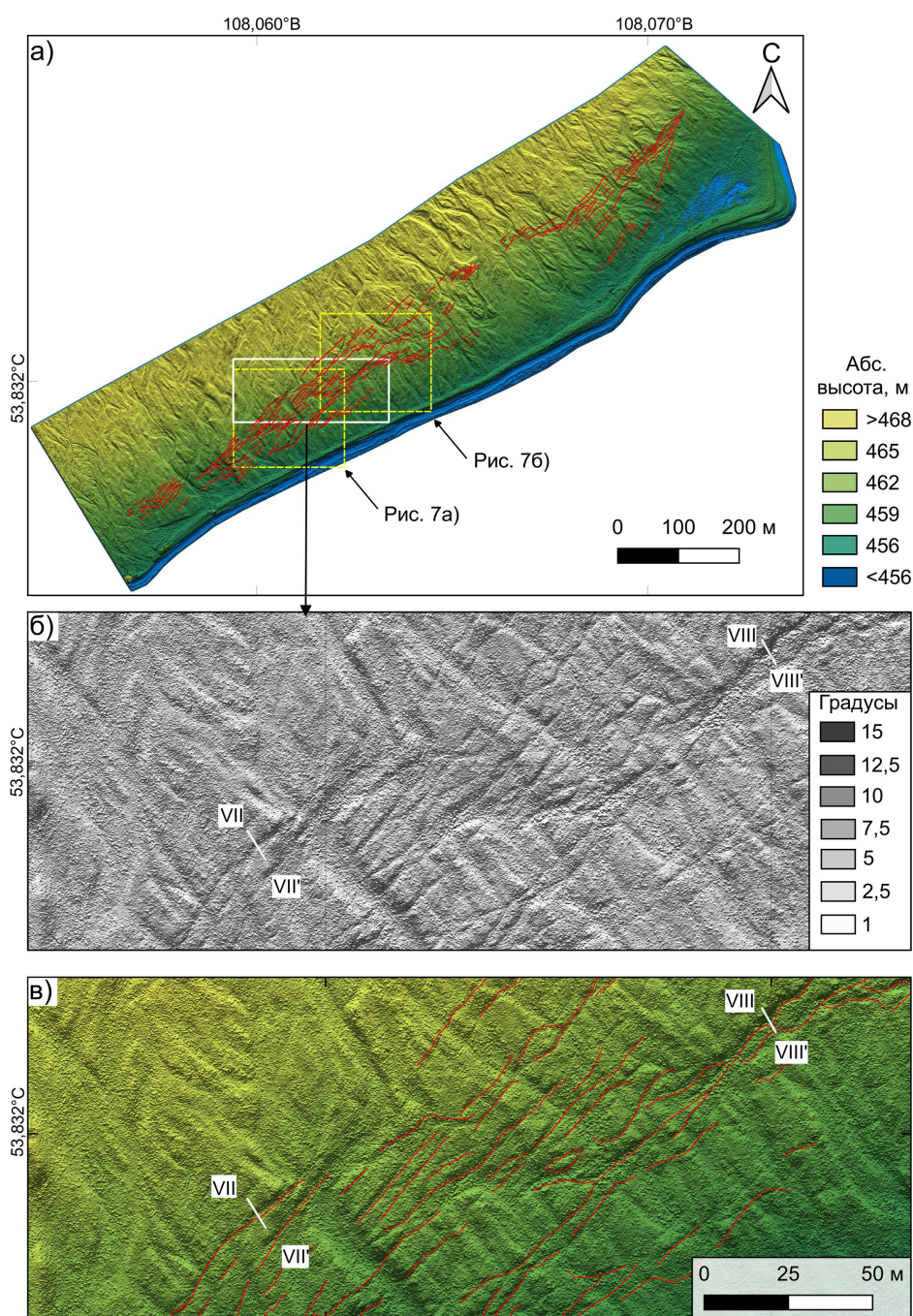


Рис. 4. ЦММ южного локального участка дельты р. Риты (а) и ее фрагменты (б–в). На «б» представлена ЦММ в виде карты углов наклона поверхности для более контрастного отображения современных разрывов. Римскими цифрами обозначены номера профилей, показанные на рис. 7, красными линиями на «а» и «в» – выходы разрывов.

тодов и инструментальных измерений того времени имели весьма низкую точность, поэтому результаты получились весьма противоречивыми. В частности, дельта р. Риты, образующая мыс Рытый, по данным Н. В. Думитрашко и Г. Б. Пальшина относится к берегу поднятия, а по данным В. В. Ламакина она находится в нейтральном состоянии. Современные методы исследований земной поверхности, такие как GPS-геодезия, не охватывают северо-западное побережье оз. Байкал севернее пос. Онгурен,

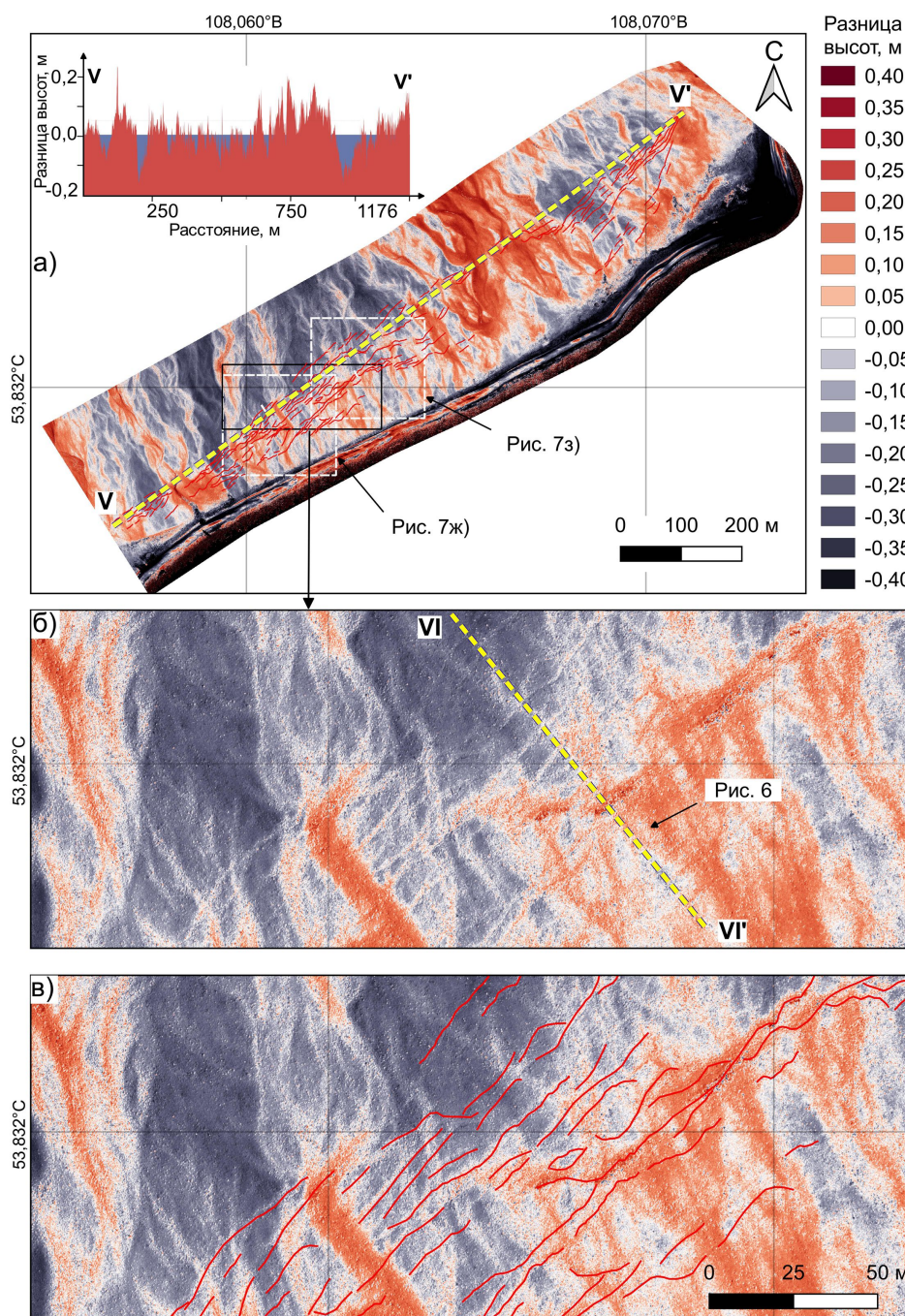
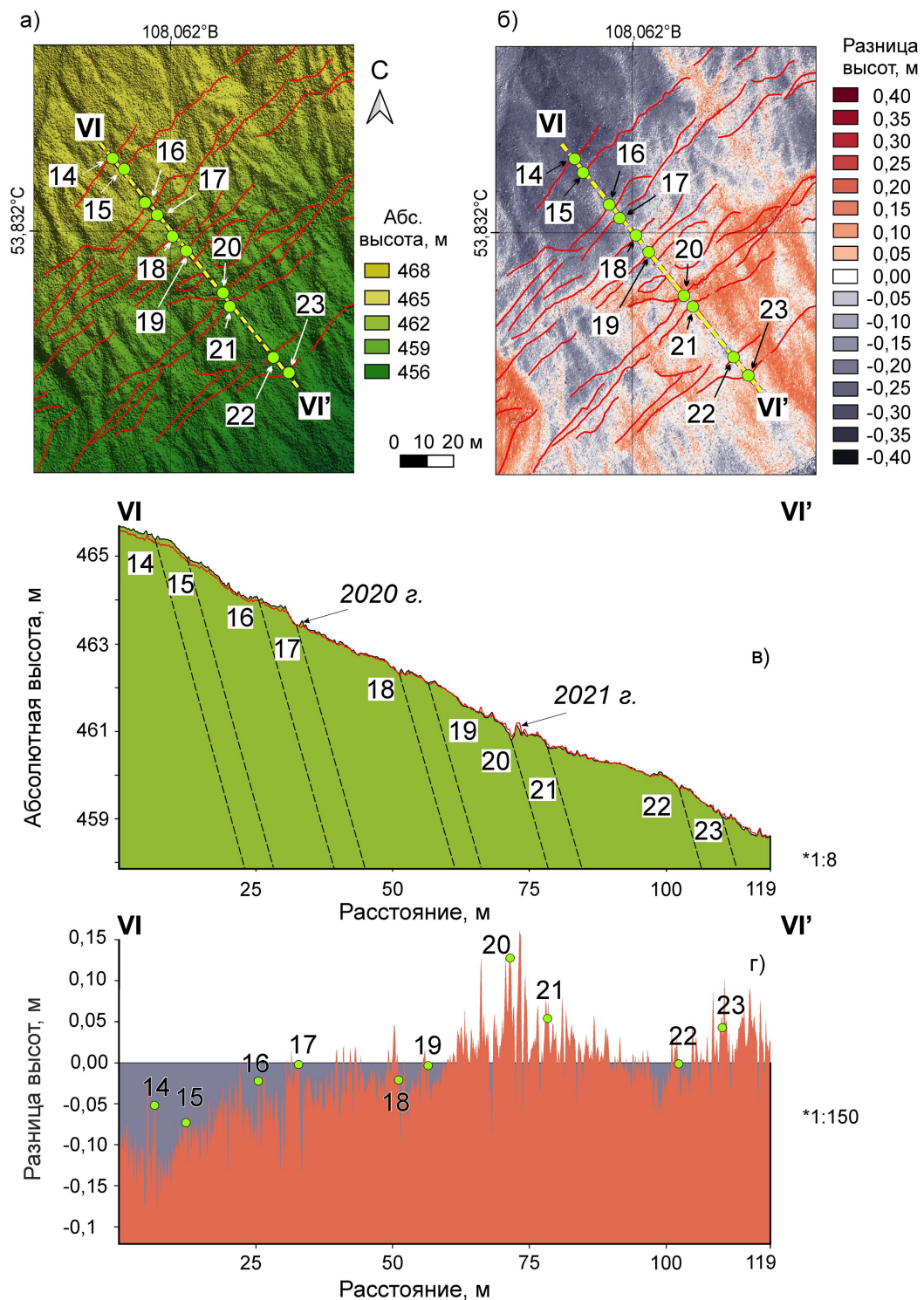


Рис. 5. Вертикальное изменение земной поверхности за период с 03.07.2020 по 22.06.2021 гг. на южном локальном участке (а) и его увеличенных фрагментах (б–в). Римскими цифрами обозначены номера профилей, показанные здесь и на рис. 6, красными линиями на «а» и «в» – современные сейсмогравитационные разрывы.

где расположен последний пункт GPS-наблюдений, показывающий горизонтальную скорость движения 2,1 мм/год на восток-юго-восток [Lukhnev et al., 2013].

Наши исследования детальных участков дельты р. Риты по данным измерений земной поверхности в 2020–2021 гг. показали, что в целом ее приозерный край опускается со средней скоростью 5–10 см/год, что закономерно, так как дельта расположена в висячем крыле Кочериковского разлома, характеризующегося сбросовым типом подвижки. Наибольшие просадки происходят в зонах сейсмогравитационных разрывов



*Соотношение горизонтального и вертикального масштабов

Рис. 6. Фрагмент ЦММ южного локального участка дельты р. Риты (а) и вертикальное изменение земной поверхности в его пределах за период с 03.07.2020 по 22.06.2021 гг. (б) с положением профиля VI через всю зону современных разрывов, построенного по ЦММ рельефа (в) и разнице высот (г). Арабскими цифрами и зелеными кружками обозначены выходы разрывов, показанные красными линиями на «а» и «б», пунктиром с условным падением на «в». См. положение профиля на рис. 5.

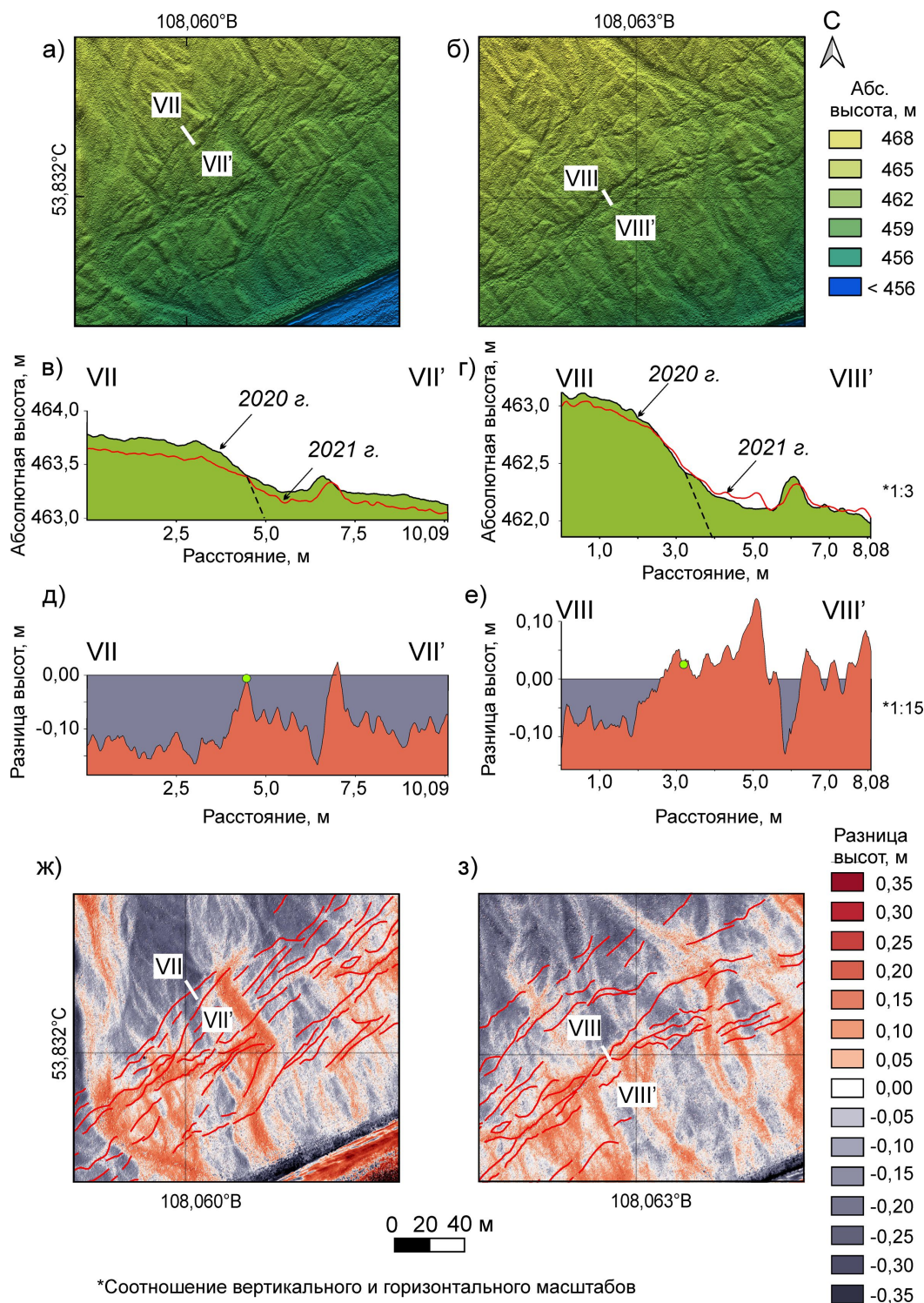


Рис. 7. Фрагменты ЦММ южного локального участка дельты р. Риты (а–б) и вертикальное изменение земной поверхности в его пределах за период с 03.07.2020 по 22.06.2021 гг. (ж–з) с положением профилей VII и VIII через отдельные разрывы, построенных по ЦММ (в–г) и разнице высот (д–е). Зелеными кружками на «д» и «е» и пунктиром с условным падением на «в» и «г» обозначены выходы разрывов, показанные красными линиями на «ж» и «з».

и могут достигать первых десятков см за год. Однако, такие высокие значения являются результатом комплекса факторов, к которым относятся оседание и уплотнение осадков под собственным весом, их перенос водными потоками с одного места на другое,

эрозионная деятельность и в некоторой степени тектоника и сейсмичность. Если на северном участке практически не наблюдается новых отложений, за исключением озерных на берегу (рис. 2в), то на южном – отрицательные изменения земной поверхности в значительной мере компенсируются вновь принесенными осадками, отлагающимися в пониженных участках.

Учитывая заметную разницу в опускании на северном участке дельты р. Риты в целом и в осевых частях субмеридиональных разрывов (рис. 2г), следует признать, что тектонический и сейсмический факторы существенно увеличивают величины оседания, которые местами значительно выше значений для крупных речных дельт мира [Tessler *et al.*, 2018]. Так, среднегодовые скорости опускания дельты р. Хуанхэ составляют 0–3 см, а максимум достигает 7 см [Liu *et al.*, 2021]. Восточная часть дельты р. Ганг и р. Брахмапутра опускается в среднем со скоростью 0–1,8 см/год [Higgins *et al.*, 2014]. Проявление разрывов в рельефе северо-восточного сегмента зоны даже на фоне их заполнения осадками (рис. 5), компенсирующих в некоторой степени понижение краевой части дельты, подтверждает данный вывод. Иначе произошло бы полное выравнивание конуса выноса. Вместе с тем, разная выраженность нарушений и изменчивость величин оседания свидетельствует о пространственной неравномерности накопления напряжений и их реализации в виде медленных или быстрых смещений в гранулированной среде. Напряжения передаются от обломка к обломку через точки их соприкосновения в рыхлом осадочном грунте, а состояние контакта зерен оказывает сильное влияние на амплитуду и скорость уединенной сдвиговой волны [Быков, 1999], и, следовательно, на последующую деформацию.

Процессы, происходящие в устье р. Риты, могут быть характерны для других дельт и конусов выноса рек, впадающих в оз. Байкал. Так в подводной части дельты р. Селенги по батиметрическим данным и материалам многоканального сейсмического профилирования в осадочных толщах фиксируются тектонические уступы, смещения и гравитационное оседание блоков, ассоциируемое с сеймотектонической активизацией [Хлыстов *и др.*, 2016]. Минимальные оценки оседания дельты за длительный период времени 6–8 мм/год не учитывают уплотнение осадков и могут быть существенно выше [Dong *et al.*, 2016]. Поскольку величина стока речных наносов определяется обычно в тоннах в год, нет возможности провести прямое сопоставление оценок осадконакопления в дельте р. Риты с другими реками, впадающими в оз. Байкал. Но тот факт, что величина стока наносов за последние десятилетия снизилась в среднем в 1,5–3 раза, а в сравнении с периодом до наступления потепления климата в 3–5 раз [Потемкина *и Потемкин*, 2023], свидетельствует о том, что сеймотектонический фактор в таких условиях играет еще более значимую роль. Так, на фоне снижения величины стока наносов в период с 1980 по 2013 гг. площадь дельты р. Селенги существенно сократилась и произошло ее затопление [Бабич *и др.*, 2015].

Опубликованные примеры несейсмического разрывообразования инфраструктуры [Howard and Zhou, 2019; Long *et al.*, 2021; Zervopoulou *et al.*, 2007] и просядков [Higgins, 2015; Liu *et al.*, 2021; Schmidt, 2015] в городах и поселках демонстрируют насколько в целом широка проблема выявления причин деформаций в геологической среде, приводящая к экономическим потерям. Естественное уплотнение в сочетании с уменьшенной агградацией можно считать первопричиной оседания всех речных дельт. По площади его величина должна быть распределена относительно равномерно, поэтому значение оседания, равное 5–10 см для дельты р. Риты можно считать ассоциированным с этим фактором. Выкачивание флюидов в больших объемах приводит к более высоким скоростям отрицательных изменений земной поверхности, чем любой другой известный процесс [Higgins, 2015]. Однако в пределах дельты р. Риты и за десятки километров от нее нет никакой подобной антропогенной деятельности. Следовательно, оседание со значением меньше –10 см обусловлены эрозией или наличием разрыва, в зоне которого дезинтегрированный аллювий просаживается быстрее вследствие воздействия экзогенных и эндогенных процессов. Зная положение нарушений и направление проток нетрудно в каждом конкретном случае выделить ведущие факторы, влияющие на изменение земной поверхности.

5. Заключение

В 2019 г. в приозерной части дельты р. Риты на северо-западном побережье оз. Байкал впервые обнаружена зона сейсмогравитационных разрывов [Лунина и Гладков, 2022]. Повторная аэрофотосъемка локальных участков в 2020 и 2021 гг. и сравнение их ЦММ выявили оседание приозерной части дельты за 11 месяцев и 19 дней в среднем на 5–10 см. Эти значения ассоциируются с естественным уплотнением аллювия. В местах накопления осадков агградация при прочих равных условиях в среднем происходит на аналогичные величины, уравновешивая баланс отложений.

В местах выхода сейсмогравитационных нарушений в отсутствии наносов просадки достигают 33–37 см, что указывает на активные эндогенные и экзогенные процессы в зоне Кочериковского разлома. Наибольшие отрицательные и положительные вертикальные изменения земной поверхности до 40 см произошли в пределах галечного пляжа и связаны с волноприбойной деятельностью (рис. 2в и 5а). Самая крайняя, вдающаяся в озеро, заболоченная часть мыса Рытого испытала максимальное опускание за год. В местах расположения отдельных деревьев у берега положительные значения разницы высот связаны с их ростом, а локальные отрицательные значения в руслах временных проток – с интенсивной эрозией.

Наибольшее накопление аллювия произошло на южном участке дельты р. Риты в понижении, выраженном в рельефе местности (рис. 4а) и совпадающим с зоной современных разрывов, а также в аккумулятивном потоке, перекрывающем зону поверхностных нарушений (рис. 5а). За исключением этой части, разрывы хорошо проявлены на ЦММ, а значит, несмотря на интенсивные наносы, продолжают развиваться (рис. 4б, в).

Следует отметить, что изменения рельефа земной поверхности в изученной зоне разрывов следует продолжить, так как для подобных исследований необходимы многолетние наблюдения, что повышает репрезентативность данных и объективность выводов. Данная работа показывает, что сравнение разновременных ЦММ путем вычитания высотных отметок для каждого узла (пикселя) модели является перспективным методом для целей мониторинга, но необходимы коррекционные процедуры сопоставляемых ЦММ и ортофотопланов. Эффективным инструментом для сбора материала также является лидарная съемка с БПЛА.

Благодарности. Авторы благодарны Е. Б. Игнатенко за помощь при подготовке рисунков. Работы выполнены в рамках государственного задания Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук на 2021–2025 гг. «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» (проект № FWEF-2021-0009), с использованием оборудования и инфраструктуры уникальной научной установки «Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов» Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН по гранту № 075-15-2021-682. Работы проведены при сотрудничестве с ФГБУ «Заповедное Прибайкалье», предоставившего возможность выполнения научно-исследовательских работ на территории Байкало-Ленского заповедника в рамках договора № 43 от 30.05.2019 г.

Список литературы

- Agisoft LLC. Руководство пользователя Agisoft Metashape. Standart Edition, Version 1.7. — 2021. — (дата обращения 29.06.2023). https://www.agisoft.com/pdf/metashape_1_7_ru.pdf.
- Бабич Д. Б., Виноградова Н. Н., Иванов В. В. и др. Дельты рек, впадающих в озера: морфогенетические типы и современная динамика // Вестник Московского университета. Серия 5. География. — 2015. — Т. 4. — С. 18–26.
- Быков В. Г. Уединенные сдвиговые зоны в зернистой среде // Акустический журнал. — 1999. — Т. 45, № 2. — С. 169–173.
- Ладохин Н. П., Гречищев Е. К. Результаты изучения современных тектонических движений берегов оз. Байкал // Труды Восточно-Сибирского геологического института СО АН СССР. — 1961. — Т. 3. — С. 17–25.

- Лебедева М. А., Саньков В. А., Захаров А. И. *и др.* Активные деформации в зоне влияния разломов Мондинской впадины по данным РСА-интерферометрии // Вестник СибГАУ. — 2013. — Т. 5, № 51. — С. 63–65.
- Лунина О. В., Гладков А. А. Феномен разрывообразования в дельтовых отложениях мыса Рытый на северо-западном побережье оз. Байкал // Геология и геофизика. — 2022. — Т. 62, № 2. — С. 149–162. — DOI: [10.15372/gig2020204](https://doi.org/10.15372/gig2020204).
- Орлов А. П. Об изменении уровня оз. Байкал // Известия Сибирского отдела Императорского РГО. — 1870. — Т. 1, № 2. — С. 6–18.
- Потемкина Т. Г., Потемкин В. Л. Сток наносов озера Байкал: изменения и тенденции // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». — 2023. — Т. 43. — С. 79–90. — DOI: [10.26516/2073-3402.2023.43.79](https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.79).
- Хлыстов О. М., Кононов Е. Е., Хабуев А. В. *и др.* Геолого-геоморфологические особенности Посольской банки и Кукуйской гривы озера Байкал // Геология и геофизика. — 2016. — Т. 57, № 12. — С. 2229–2239. — DOI: [10.15372/GiG20161208](https://doi.org/10.15372/GiG20161208).
- Черский И. Д. О результатах исследований оз. Байкал // Записки Императорского РГО по общей географии. — 1886. — Т. 15, № 3. — С. 1–48.
- Beazot F., Garzonio R., Di Mauro B., *et al.* Kinematics of an Alpine rock glacier from multi-temporal UAV surveys and GNSS data // *Geomorphology*. — 2022. — Vol. 402. — P. 108116. — DOI: [10.1016/j.geomorph.2022.108116](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108116).
- Dong T. Y., Nittrouer J. A., Il'icheva E., *et al.* Controls on gravel termination in seven distributary channels of the Selenga River Delta, Baikal Rift basin, Russia // *Geological Society of America Bulletin*. — 2016. — Vol. 128, no. 7/8. — P. 1297–1312. — DOI: [10.1130/B31427.1](https://doi.org/10.1130/B31427.1).
- Higgins S. A. Review: Advances in delta-subsidence research using satellite methods // *Hydrogeology Journal*. — 2015. — Vol. 24, no. 3. — P. 587–600. — DOI: [10.1007/s10040-015-1330-6](https://doi.org/10.1007/s10040-015-1330-6).
- Higgins S. A., Overeem I., Steckler M. S., *et al.* InSAR measurements of compaction and subsidence in the Ganges-Brahmaputra Delta, Bangladesh // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. — 2014. — Vol. 119, no. 8. — P. 1768–1781. — DOI: [10.1002/2014JF003117](https://doi.org/10.1002/2014JF003117).
- Howard K. W. F., Zhou W. Overview of ground fissure research in China // *Environmental Earth Sciences*. — 2019. — Vol. 78, no. 3. — DOI: [10.1007/s12665-019-8114-6](https://doi.org/10.1007/s12665-019-8114-6).
- Hu L., Navarro-Hernández M. I., Liu X., *et al.* Analysis of regional large-gradient land subsidence in the Alto Guadalentín Basin (Spain) using open-access aerial LiDAR datasets // *Remote Sensing of Environment*. — 2022. — Vol. 280. — P. 113218. — DOI: [10.1016/j.rse.2022.113218](https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113218).
- Liu Y., Liu J., Xia X., *et al.* Land subsidence of the Yellow River Delta in China driven by river sediment compaction // *Science of The Total Environment*. — 2021. — Vol. 750. — P. 142165. — DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.142165](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142165).
- Long Z., Yumei L., Yong L., *et al.* An extension-dominant 9-km-long ground failure along a buried geological fault on the eastern Beijing Plain, China // *Engineering Geology*. — 2021. — Vol. 289. — P. 106168. — DOI: [10.1016/j.enggeo.2021.106168](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106168).
- Loucks D. P. Developed river deltas: are they sustainable? // *Environmental Research Letters*. — 2019. — Vol. 14, no. 11. — P. 113004. — DOI: [10.1088/1748-9326/ab4165](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4165).
- Lukhnev A. V., San'kov V. A., Miroshnichenko A. I., *et al.* GPS-measurements of recent crustal deformation in the junction zone of the rift segments in the central Baikal rift system // *Russian Geology and Geophysics*. — 2013. — Vol. 54, no. 11. — P. 1417–1426. — DOI: [10.1016/j.rgg.2013.10.010](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.010).
- Rossini M., Di Mauro B., Garzonio R., *et al.* Rapid melting dynamics of an alpine glacier with repeated UAV photogrammetry // *Geomorphology*. — 2018. — Vol. 304. — P. 159–172. — DOI: [10.1016/j.geomorph.2017.12.039](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.039).
- Schmidt C. W. Delta Subsidence: An Imminent Threat to Coastal Populations // *Environmental Health Perspectives*. — 2015. — Vol. 123, no. 8. — DOI: [10.1289/ehp.123-A204](https://doi.org/10.1289/ehp.123-A204).
- Tessler Z. D., Vörösmarty C. J., Overeem I., *et al.* A model of water and sediment balance as determinants of relative sea level rise in contemporary and future deltas // *Geomorphology*. — 2018. — Vol. 305. — P. 209–220. — DOI: [10.1016/j.geomorph.2017.09.040](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.040).
- Valkaniotis S., Papanthassiou G., Ganas A. Mapping an earthquake-induced landslide based on UAV imagery; case study of the 2015 Okeanos landslide, Lefkada, Greece // *Engineering Geology*. — 2018. — Vol. 245. — P. 141–152. — DOI: [10.1016/j.enggeo.2018.08.010](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.08.010).
- Yang Y.-H., Xu Q., Hu J.-C., *et al.* Source Model and Triggered Aseismic Faulting of the 2021 Mw 7.3 Maduo Earthquake Revealed by the UAV-Lidar/Photogrammetry, InSAR, and Field Investigation // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14, no. 22. — P. 5859. — DOI: [10.3390/rs14225859](https://doi.org/10.3390/rs14225859).

- Zervopoulou A., Chatzipetros A., Tsiokos L., *et al.* Non-seismic surface faulting: the peraia fault case study (Thessaloniki, N. Greece) // 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper No. 1610. — Thessaloniki (Greece) : ISSMGE, 2007.
- Zhong W., Chu T., Tissot P., *et al.* Integrated coastal subsidence analysis using InSAR, LiDAR, and land cover data // Remote Sensing of Environment. — 2022. — Vol. 282. — P. 113297. — DOI: [10.1016/j.rse.2022.113297](https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113297).

SUBSIDENCE AND SEDIMENTATION DYNAMICS OF THE LAKESIDE PART OF THE RITA RIVER DELTA IN THE RUPTURE ZONE, THE NORTHWESTERN COAST OF LAKE BAIKAL

O. V. Lunina^{**1}  and A. A. Gladkov^{1,2} 

¹Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

²Center for the Development of Continuing Education of Children, Ministry of Education of Irkutsk Region, Irkutsk, Russia

****Correspondence to:** Oksana V. Lunina, lounina@crust.irk.ru

Delta subsidence is one of the key problems of human life as these areas are developed quite fast. The process is natural and depends on many factors, the influence of which has not yet been sufficiently studied. This study is aimed to identify changes in the earth's surface of the lakeside part of the Rita River delta on the northwestern coast of Lake Baikal, where a zone of seismically induced gravitational ruptures were recently mapped. To assess topographic changes, we used the calculation of the difference in multi-temporal digital surface models (DSM) obtained in two local areas from ultra-high resolution unmanned aerial photography in 2020 and 2021. We established that the subsidence of the lakeside part of the delta occurred on average by 5–10 cm over 11 months and 19 days. These values are associated with natural sediment compaction. In places of their accumulation, aggradation occurs by similar values, compensating the balance of deposits. In the seismically induced gravitational failures in the absence of alluvium, subsidence reached 33–37 cm, which indicates active endogenous and exogenous processes in the Kocherikovskiy fault zone. The largest negative and positive vertical topographic changes up to 40 cm occurred within the beach and were associated with wave-cutting activity. The most extreme swampy part of Cape Rytyi experienced the maximum subsidence per a year. The greatest accumulation of alluvium occurred in the southern section of the Rita River delta in a settling expressed in the surface and coinciding with the zone of recent ruptures, as well as in an accumulative flow that overlaps the zone of surface deformations. With the exception of this part, discontinuities are well exhibited on DSM that means they continue to develop despite intensive sedimentation. Comparison of multi-temporal DSM and DTM by calculating the difference in elevation for each node (pixel) of the model is a promising and inexpensive method for monitoring surface deformations.

Received: 30 June 2023

Accepted: 22 September 2023

Published: 30 December 2023

Keywords: rupture zone, delta, subsidence, unmanned aerial system, digital surface model, Baikal

Citation: Lunina, O. V. and A. A. Gladkov (2023), Subsidence and Sedimentation Dynamics of the Lakeside Part of the Rita River Delta in the Rupture Zone, the Northwestern Coast of Lake Baikal, *Russian Journal of Earth Sciences*, 23, ES6006, <https://doi.org/10.2205/2023ES000874> EDN: HTCABO



© 2023. The Authors.

References

- Agisoft LLC. Agisoft Metashape User Guide. Standard Edition, Version 1.7. — 2021. — (access date 06.29.2023). https://www.agisoft.com/pdf/metashape_1_7_ru.pdf.
- Babich D. B., Vinogradova N. N., Ivanov V. V., *et al.* Deltas of the rivers running in to lakes and reservoirs: Morphogenetic types and recent dynamics // Moscow University Bulletin. Series 5, Geography. — 2015. — Vol. 4. — P. 18–26.

- Bearzot F., Garzonio R., Di Mauro B., *et al.* Kinematics of an Alpine rock glacier from multi-temporal UAV surveys and GNSS data // *Geomorphology*. — 2022. — Vol. 402. — P. 108116. — DOI: [10.1016/j.geomorph.2022.108116](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108116).
- Bykov V. G. Isolated Shear Zones in Granular Medium // *Acoustic journal*. — 1999. — Vol. 45, no. 2. — P. 169–173.
- Chersky I. D. About the results of research on lake Baikal // *Notes of the Imperial Russian Geographical Society on general geography*. — 1886. — Vol. 15, no. 3. — P. 1–48.
- Dong T. Y., Nittrouer J. A., Il'icheva E., *et al.* Controls on gravel termination in seven distributary channels of the Selenga River Delta, Baikal Rift basin, Russia // *Geological Society of America Bulletin*. — 2016. — Vol. 128, no. 7/8. — P. 1297–1312. — DOI: [10.1130/B31427.1](https://doi.org/10.1130/B31427.1).
- Higgins S. A. Review: Advances in delta-subsidence research using satellite methods // *Hydrogeology Journal*. — 2015. — Vol. 24, no. 3. — P. 587–600. — DOI: [10.1007/s10040-015-1330-6](https://doi.org/10.1007/s10040-015-1330-6).
- Higgins S. A., Overeem I., Steckler M. S., *et al.* InSAR measurements of compaction and subsidence in the Ganges-Brahmaputra Delta, Bangladesh // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. — 2014. — Vol. 119, no. 8. — P. 1768–1781. — DOI: [10.1002/2014JF003117](https://doi.org/10.1002/2014JF003117).
- Howard K. W. F., Zhou W. Overview of ground fissure research in China // *Environmental Earth Sciences*. — 2019. — Vol. 78, no. 3. — DOI: [10.1007/s12665-019-8114-6](https://doi.org/10.1007/s12665-019-8114-6).
- Hu L., Navarro-Hernández M. I., Liu X., *et al.* Analysis of regional large-gradient land subsidence in the Alto Guadalentín Basin (Spain) using open-access aerial LiDAR datasets // *Remote Sensing of Environment*. — 2022. — Vol. 280. — P. 113218. — DOI: [10.1016/j.rse.2022.113218](https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113218).
- Khlystov O. M., Kononov E. E., Khabuev A. V., *et al.* Geological and geomorphological characteristics of the Posolsky Bank and the Kukuy Griva, lake Baikal // *Russian Geology and Geophysics*. — 2016. — Vol. 57, no. 12. — P. 2229–2239. — DOI: [10.15372/GiG20161208](https://doi.org/10.15372/GiG20161208).
- Ladokhin N. P., Grechishchev E. K. Results of studying modern tectonic movements of the shores of the lake Baikal // *Proceedings of the East Siberian Geological Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences*. — 1961. — Vol. 3. — P. 17–25.
- Lebedeva M. A., Sankov V. A., Zakharov A. I., *et al.* Active deformations in the zone of influence of faults of Mondy basin by SAR interferometry data // *Bulletin of SibSAU*. — 2013. — Vol. 5, no. 51. — P. 63–65.
- Liu Y., Liu J., Xia X., *et al.* Land subsidence of the Yellow River Delta in China driven by river sediment compaction // *Science of The Total Environment*. — 2021. — Vol. 750. — P. 142165. — DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.142165](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142165).
- Long Z., Yumei L., Yong L., *et al.* An extension-dominant 9-km-long ground failure along a buried geological fault on the eastern Beijing Plain, China // *Engineering Geology*. — 2021. — Vol. 289. — P. 106168. — DOI: [10.1016/j.enggeo.2021.106168](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106168).
- Loucks D. P. Developed river deltas: are they sustainable? // *Environmental Research Letters*. — 2019. — Vol. 14, no. 11. — P. 113004. — DOI: [10.1088/1748-9326/ab4165](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4165).
- Lukhnev A. V., San'kov V. A., Miroshnichenko A. I., *et al.* GPS-measurements of recent crustal deformation in the junction zone of the rift segments in the central Baikal rift system // *Russian Geology and Geophysics*. — 2013. — Vol. 54, no. 11. — P. 1417–1426. — DOI: [10.1016/j.rgg.2013.10.010](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.010).
- Lunina O. V., Gladkov A. A. The rupturing phenomena in the deltaic deposits of cape Rytyi on the northwestern shore of lake Baikal (based on aerial-photography data) // *Russian Geology and Geophysics*. — 2022. — Vol. 62, no. 2. — P. 149–162. — DOI: [10.15372/gig2020204](https://doi.org/10.15372/gig2020204).
- Orlov A. P. About changes in the level of lake Baikal // *News of the Siberian Department of the Imperial Russian Geographical Society*. — 1870. — Vol. 1, no. 2. — P. 6–18.
- Potemkina T. G., Potemkin V. L. Sediment Load Runoff of Lake Baikal Tributaries: Changes and Trends // *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*. — 2023. — Vol. 43. — P. 79–90. — DOI: [10.26516/2073-3402.2023.43.79](https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.79).
- Rossini M., Di Mauro B., Garzonio R., *et al.* Rapid melting dynamics of an alpine glacier with repeated UAV photogrammetry // *Geomorphology*. — 2018. — Vol. 304. — P. 159–172. — DOI: [10.1016/j.geomorph.2017.12.039](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.039).
- Schmidt C. W. Delta Subsidence: An Imminent Threat to Coastal Populations // *Environmental Health Perspectives*. — 2015. — Vol. 123, no. 8. — DOI: [10.1289/ehp.123-A204](https://doi.org/10.1289/ehp.123-A204).
- Tessler Z. D., Vörösmarty C. J., Overeem I., *et al.* A model of water and sediment balance as determinants of relative sea level rise in contemporary and future deltas // *Geomorphology*. — 2018. — Vol. 305. — P. 209–220. — DOI: [10.1016/j.geomorph.2017.09.040](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.040).
- Valkaniotis S., Papanthassiou G., Ganas A. Mapping an earthquake-induced landslide based on UAV imagery; case study of the 2015 Okeanos landslide, Lefkada, Greece // *Engineering Geology*. — 2018. — Vol. 245. — P. 141–152. — DOI: [10.1016/j.enggeo.2018.08.010](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.08.010).

- Yang Y.-H., Xu Q., Hu J.-C., *et al.* Source Model and Triggered Aseismic Faulting of the 2021 Mw 7.3 Maduo Earthquake Revealed by the UAV-Lidar/Photogrammetry, InSAR, and Field Investigation // Remote Sensing. — 2022. — Vol. 14, no. 22. — P. 5859. — DOI: [10.3390/rs14225859](https://doi.org/10.3390/rs14225859).
- Zervopoulou A., Chatzipetros A., Tsiokos L., *et al.* Non-seismic surface faulting: the peraia fault case study (Thessaloniki, N. Greece) // 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper No. 1610. — Thessaloniki (Greece) : ISSMGE, 2007.
- Zhong W., Chu T., Tissot P., *et al.* Integrated coastal subsidence analysis using InSAR, LiDAR, and land cover data // Remote Sensing of Environment. — 2022. — Vol. 282. — P. 113297. — DOI: [10.1016/j.rse.2022.113297](https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113297).