



CATASTROPHIC KARST-SUFFOSION SINKHOLE IN THE KHADAKHAN-MELKHITUI KARST MASSIF, SOUTHERN PRIANGARIE: FACTORS, ENVIRONMENT, MECHANISM

O.A. Mazaeva , V.V. Akulova , A.A. Yuriev , E.P. Dushkin 

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. This paper presents the results of a comprehensive study of a catastrophic karst-suffosion sinkhole that occurred on September 19, 2024, in the Khadakh-Melkhituy karst massif (Southern Angara region) and resulted in a human fatality. Using UAV-derived data, the morphometric parameters of the sinkhole were determined (depth 9.7 m, volume 412 m³), and a comparison was made with historical monitoring data from the 1980s. Laboratory tests performed on samples collected from the sinkhole walls revealed that the 9.7-m thick cover sequence consists of structurally unstable loess-like loams and sandy loams, with anomalously high silt content (up to 84 %) and porosity (up to 64 %). The interaction between karst and suffosion processes plays a key role in the sinkhole formation. The long-term (57-year) backwater effect of the Bratsk Reservoir and its cyclic level fluctuations caused leaching of sulfate-carbonate rocks, promoting mechanical removal of silt-sized particles from the cover sequence by percolating water. A two-stage mechanism of karst-suffosion sinkhole development was identified: from the formation of a loosening zone above an ancient karst cavity to the instantaneous (brittle) roof collapse triggered by a technogenic factor – the weight of heavy agricultural machinery. The study of the reactivation of karst-suffosion processes in the backwater zone of the Bratsk Reservoir contributes to the understanding of modern geodynamic processes and ground surface deformation mechanisms, including those induced by technogenesis.

KEYWORDS: exogeodynamics; tectonic fracturing; catastrophic sinkhole; covered sulphate-carbonate karst; backwater zone; Bratsk Reservoir; mechanism of process interactions; loess-like deposits; suffusion

FUNDING: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 1025022500090-2-1.5.1-1.5.1, research topic FWEF-2026-0009 "Paleogeography, Dynamics and Evolution of the Natural Environment of Eastern Siberia in the Mesozoic and Cenozoic"). The work was conducted using equipment and infrastructure of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust SB RAS (grant No. 075-15-2021-682).



EDN: IDARV

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Oksana A. Mazaeva, moks@crust.irk.ru

Received: March 30, 2026

Revised: May 8, 2026

Accepted: May 14, 2026

FOR CITATION: Mazaeva O.A., Akulova V.V., Yuriev A.A., Dushkin E.P., 2026. Catastrophic Karst-Suffosion Sinkhole in the Khadakh-Melkhitui Karst Massif, Southern Priangarie: Factors, Environment, Mechanism. *Geodynamics & Tectonophysics* 17 (3), 0895. doi:10.5800/GT-2026-17-3-0895

КАТАСТРОФИЧЕСКИЙ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫЙ ПРОВАЛ НА ХАДАХАН-МЕЛЬХИТУЙСКОМ КАРСТОВОМ МАССИВЕ, ЮЖНОЕ ПРИАНГАРЬЕ: ФАКТОРЫ, СРЕДА, МЕХАНИЗМ

О.А. Мазаева, В.В. Акулова, А.А. Юрьев, Е.П. Душкин

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты комплексного исследования катастрофического карстово-суффозионного провала, произошедшего 19 сентября 2024 г. на территории Хадахан-Мельхитуйского карстового массива (Южное Приангарье) и приведшего к гибели человека. На основе данных беспилотного летательного аппарата установлены морфометрические параметры провала (глубина 9.7 м, объем 412 м³), выполнено сравнение с историческими данными мониторинга с 1980-х гг. По результатам детальных лабораторных испытаний проб из стенок провала обнаружено, что покрывающая толща мощностью 9.7 м представлена структурно-неустойчивыми лессовидными суглинками и супесями с аномально высокими значениями пылеватости (до 84 %) и пористости (до 64 %). Установлено, что ключевую роль в провалообразовании играет взаимодействие карстовых и суффозионных процессов. Длительное (57 лет) влияние подпора Братского водохранилища и циклы колебания его уровня привели к выщелачиванию сульфатно-карбонатных пород, что стимулировало механический вынос пылеватых частиц из покрывающей толщи фильтрующейся водой. Выявлен двухстадийный механизм развития карстово-суффозионного провала: от формирования зоны разуплотнения над древней карстовой полостью до мгновенного (хрупкого) обрушения свода под воздействием техногенного триггера (веса тяжелой сельскохозяйственной техники). Изучение активизации карстово-суффозионных процессов в береговой зоне водохранилища вносит вклад в понимание современных геодинамических процессов и механизмов деформации земной поверхности, в том числе и под влиянием техногенеза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экзогеодинамика; тектоническая трещиноватость; катастрофический провал; покрытый сульфатно-карбонатный карст; зона подпора; Братское водохранилище; механизм взаимодействия процессов; лессовидные отложения; суффозия

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 1025022500090-2-1.5.1-1.5.1, тема FWEF-2026-0009 «Палеогеография, динамика и эволюция природной среды Восточной Сибири в мезозое и кайнозое»). Работа выполнена с использованием оборудования и инфраструктуры ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (грант № 075-15-2021-682).

1. ВВЕДЕНИЕ

Карст представляет собой комплекс природных и природно-техногенных процессов и явлений аномального изменения физического состояния твердых горных пород в результате их растворения и выщелачивания природными и техногенными водами с образованием поверхностных и подземных пустот разной формы и размеров [Ivanov, Trzhtsinsky, 2001].

Карстовые ландшафты имеют глобальное распространение, охватывая, по различным оценкам, от 12 до 20 % площади земной суши [Waltham et al., 2005; Ford, Williams, 2007; Furlani et al., 2009; De Waele et al., 2011; Yechieli et al., 2016; Silva et al., 2017; Goldscheider et al., 2020; Liang et al., 2018; Masilela, Beckedahl, 2022; Maksimovich et al., 2022; Klimchouk et al., 2023]. На территории России карстующиеся породы занимают площадь 66.5 % [Dublyansky, 2004].

На закарстованных территориях карстовый и суффозионные процессы определяют условия их освоения, устойчивость инженерных сооружений и природных массивов горных пород, так как провалы характеризуются внезапностью, высокой скоростью и неопределенностью места возникновения [Dublyansky, 2004; Milanović et al., 2019].

Современные исследования затрагивают широкий круг вопросов по антропогенному воздействию и защите карстовых экосистем [Guo, Tang, 2003; Dublyansky, 2004; Ford, Williams, 2007; De Waele et al., 2011; Gutiérrez et al., 2014; Milanović et al., 2019; Khomenko, 2020; Li et al., 2023].

Южное Приангарье является областью наиболее интенсивного проявления карста на юге Восточной Сибири. Значительный вклад в изучение этой территории внесли Н.А. Гвоздецкий, Д.С. Соколов, Г.Б. Пальшин, Г.П. Вологодский, В.М. Филиппов, Ю.Б. Тржцинский, В.М. Литвин и др. Фундаментальное обобщение по карсту региона принадлежит Г.П. Вологодскому [Vologodsky, 1975].

Особую значимость приобретает изучение карста в береговых зонах водохранилищ, где сезонные и многолетние колебания уровня воды создают условия для активизации карстовых и других экзогеодинамических процессов [Pecherkin, 1969; Ovchinnikov et al., 1999; Litvin, Akulova, 2004; Nazarov, 2004, 2008; Nazarov, Frolova, 2009].

Особое место занимают работы В.М. Филиппова [Filippov, 1983, 1988], посвященные динамике карстового процесса в зоне влияния водохранилищ Ангарского

каскада ГЭС, и В.М. Литвина [Litvin, 1991; Litvin, Trzhtsin-sky, 1993], разработавшего методику регионального районирования по степени карстовой опасности.

Сульфатно-карбонатный покрытый карст прибрежных массивов Братского водохранилища отличается наибольшей интенсивностью проявления и техногенной активизацией, продолжающейся уже в течение почти 60 лет. Актуальность детального изучения этих процессов подтверждается катастрофическими событиями природно-техногенного характера.

Объектом данного исследования является катастрофический провал (Нукутский район, Иркутская область, 53°36'58" с.ш., 103°17'57" в.д.), приведший к гибели человека 19 сентября 2024 г. Провал расположен на левом береговом склоне Братского водохранилища (по данным съемки БПЛА абс. отметка 421.9 м) южнее пос. Русский Мельхитуй (рис. 1).

Данная территория относится к области развития сульфатно-карбонатного покрытого карста в районе Хадахан-Мельхитуйского карстового массива.

В 1983 г. В.М. Литвин для Хадахан-Мельхитуйского карстового массива выделил зоны повышенной активности карста, вероятной активизации карста, зоны возможного развития карстово-суффозионных про-

цессов (рис. 2). Произшедший катастрофический провал совпал с прогнозной оценкой карстово-суффозионных процессов 1983 г.

Было установлено, что активизация карста в зоне Братского водохранилища имеет ярко выраженный унаследованный характер, развиваясь по древним карстовым пустотам выщелачивания в результате их вскрытия сопутствующими экзогенными процессами под воздействием подпора, вертикальной циркуляции подземных вод и поверхностной денудации [Filippov, 1983, 1988; Filippov, Trzhtsin-sky, 1984].

Несмотря на наличие фундаментальных основ понимания морфогенеза карстовых полостей [Gvozdetsky, 1954; Maksimovich, 1963; Vologodsky, 1975; Filippov, 1983, 1988], механизмы внезапного обрушения покровных отложений в условиях современного техногенного и гидрологического прессинга требуют уточнения с применением современных методов комплексного инженерно-геологического мониторинга [Khomenko, 1986; Waltham et al., 2005; Krasheninnikov, Khomenko, 2011, 2013, 2017; Zalaghaie et al., 2022].

Цель данного исследования – выявить механизм взаимодействия карстовых и суффозионных процессов в условиях влияния Братского водохранилища

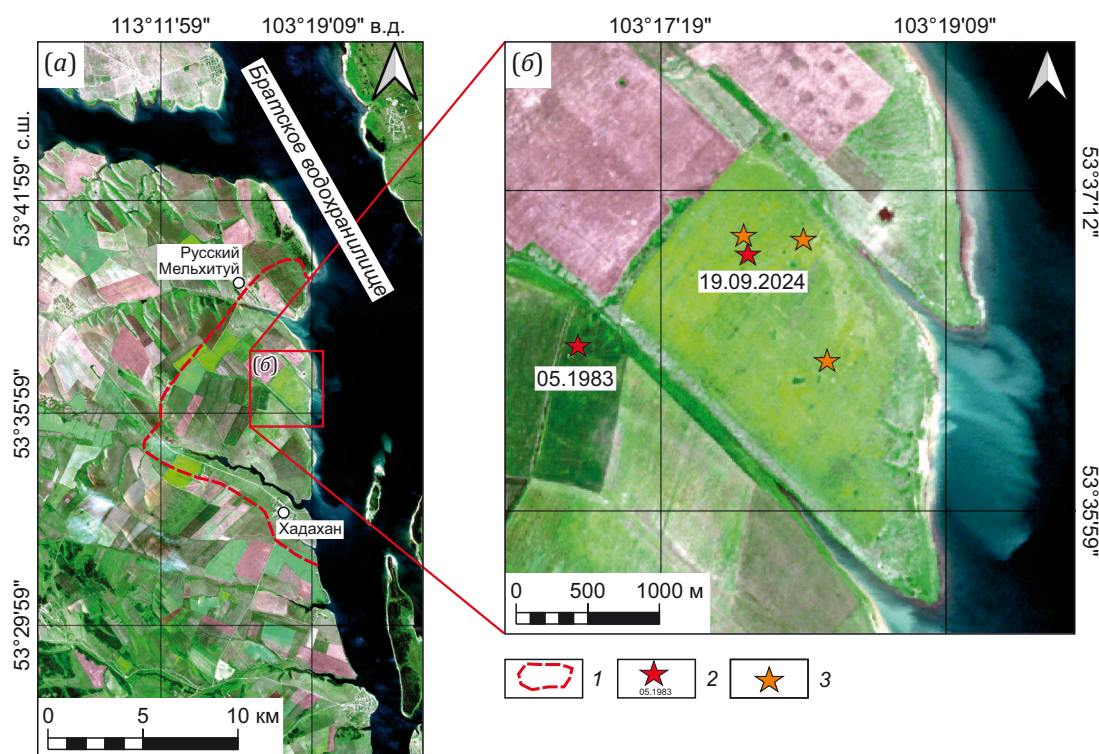


Рис. 1. Объект исследования.

(а) – пространственное положение Хадахан-Мельхитуйского карстового массива на космоснимке; (б) – увеличенный фрагмент участка расположения карстового провала. 1 – границы Хадахан-Мельхитуйского карстового массива; 2 – местоположение крупных провалов в мае 1983 г. и 19.09.2024 г.; 3 – местоположение провалов, образованных в период с июня 2021 г. по май 2024 г.

Fig. 1. Study area.

(a) – satellite image showing the location of the Khadakh-Melkhituy karst massif; (б) – close-up view of the karst sinkhole area. 1 – boundary of the Khadakh-Melkhituy karst massif; 2 – locations of the major sinkholes in May 1983 and on 19 September 2024; 3 – locations of sinkholes that formed between June 2021 and May 2024.

на основе комплексного изучения состава, структуры, состояния и свойств покровных лессовидных отложений.

Изучение активизации карстовых и суффозионных процессов в береговой зоне Братского водохранилища вносит вклад в понимание современных геодинамических процессов и механизмов деформации земной поверхности, в том числе и под влиянием техногенеза.

2. МЕТОДЫ

Для детальной оценки геоморфологических условий участка провала и дальнейшего мониторинга опасных процессов была выполнена детальная аэрофотосъемка с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Phantom 4 Pro RTK с последующей обработкой данных и построением цифровой модели местности в ПО Agisoft Metashape PRO [Agisoft..., 2022].

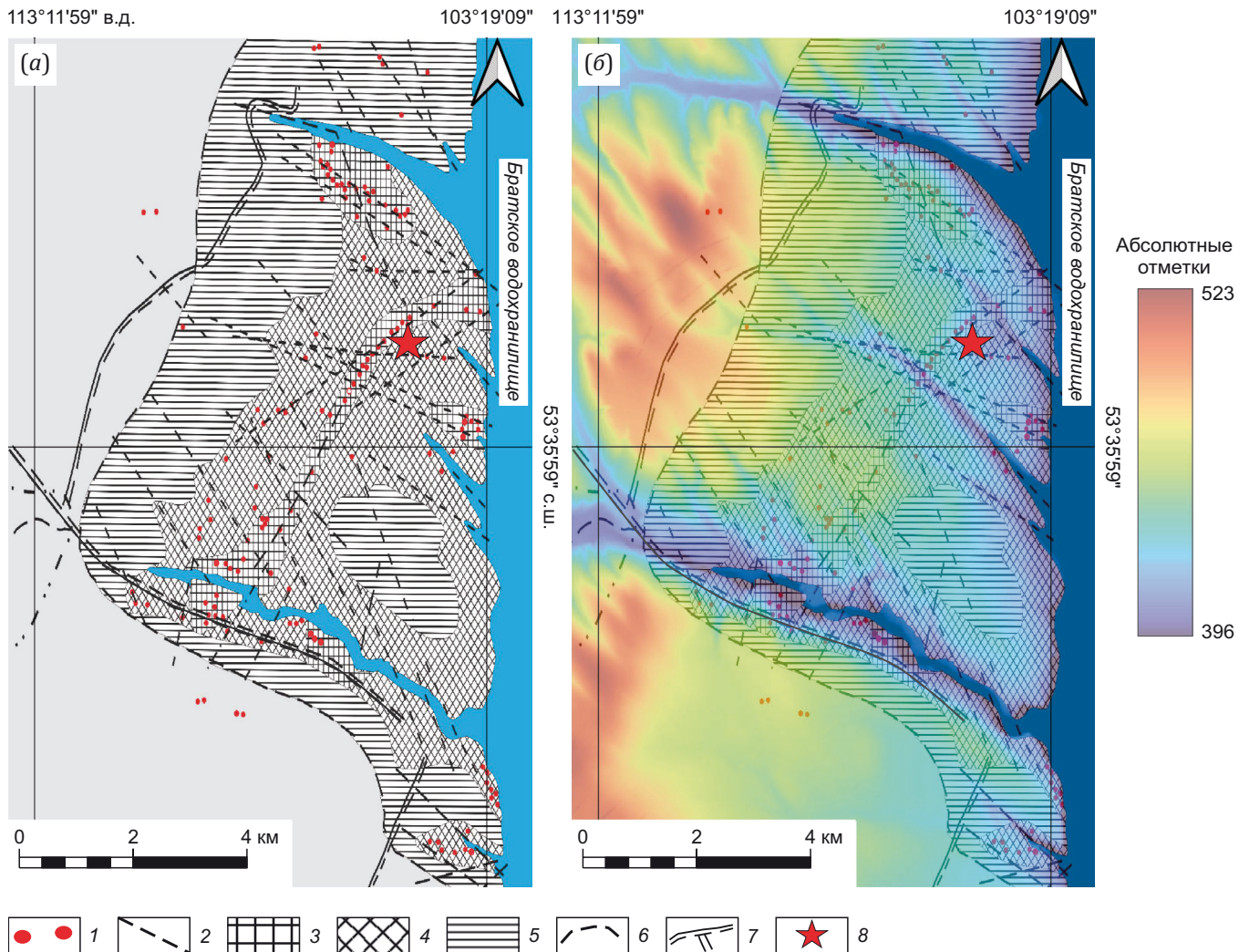


Рис. 2. Карта-схема Хадахан-Мельхитуйского карстового массива, отражающая зоны развития карста и региональную систему тектонической трещиноватости масштаба 1:50000 (составлена по карте В.М. Литвина [Litvin et al., 1983]) (а) и цифровая модель рельефа карстового массива, совмещенная с картой распространения и развития карста на Хадахан-Мельхитуйском массиве 1983 г. (б).

1 – карстово-суффозионные воронки; 2 – зоны разрывных тектонических нарушений и интенсивной трещиноватости, выявленные по аэрофотоснимкам; 3 – зоны и участки повышенной активности карста; 4 – зоны и участки вероятной активизации карстово-суффозионных процессов; 5 – зоны возможного развития карстово-суффозионных процессов; 6 – граница Хадахан-Мельхитуйского карстового массива; 7 – дороги профилированные грейдерные; 8 – место катастрофического провала 19 сентября 2024 г.

Fig. 2. Schematic map of the Khadakhan-Melkhituy karst massif showing the distribution of karst features and the regional joint set in scale 1:50000 (compiled from the map by V.M. Litvin [Litvin et al., 1983]) (a), and digital Elevation Model (DEM) of the massif overlaid on the 1983 karst distribution map of the Khadakhan-Melkhituy karst massif (b).

1 – karst-suffosion sinkholes; 2 – regional joint set and areas of high joint density interpreted from aerial imagery; 3 – zones and sectors of high karst activity; 4 – zones and sectors where the reactivation of karst-suffosion processes is probable; 5 – zones where karst-suffosion processes may potentially occur; 6 – boundary of the Khadakhan-Melkhituy karst massif; 7 – graded roads; 8 – location of the catastrophic sinkhole on September 19, 2024.

Для комплексного изучения дисперсных отложений, слагающих разрез стенки карстово-суффозионного провала (9.7 м), проведено опробование (22 пробы нарушенной и ненарушенной структуры). Оценка состава (гранулометрического, минералогического), состояния и свойств (физических, физико-химических и деформационно-прочностных) включала проведение комплекса аналитических работ в лаборатории инженерной геологии и геоэкологии, а также в ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН.

Гранулометрический состав отложений выполнялся методом пипетки со стандартной (полудисперсной) подготовкой образцов.

Определение минерального состава осуществлялось методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.0. Полуколичественные соотношения минералов рассчитаны методом корундовых чисел (RIR) согласно работе [Hubbard, Snyder, 1988]. Идентификация глинистых минералов проведена на ориентированных пробах с осаждением глинистой фракции на стеклянной подложке (воздушно-сухой суспензии), насыщенной этиленгликолем и прокаленной до 550° в течение трех часов [Brown, 1965].

Состав и содержание структурообразующих компонентов (легко водорастворимые соли, аморфные полуторные оксиды и карбонатные соли) установлены по данным химического анализа водных, соляно-кислых и щелочных вытяжек [Arunushkina, 1970].

Оценка деформационно-прочностного потенциала отложений осуществлялась путем проведения испытаний пробы ненарушенной структуры (природного сложения) на автоматизированном испытательном комплексе АСИС (ООО НПП «Геотек», г. Пенза). Значения удельного сцепления (С) и угла внутреннего трения (φ) получены методом одноплоскостного среза, модуля деформации (Е) – методом трехосного сжатия по стандартным методикам. Дополнительно определена относительная деформация набухания (E_{sw}) и объемная усадка (δ_v).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.

ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫЕ УСЛОВИЯ И ФАКТОРЫ

3.1. Геолого-структурные условия

Исследуемая территория расположена на стыке юго-западной части Лено-Ангарского моноклинального плато и северо-восточной окраины Предаянского прогиба. Геологический разрез представлен сульфатно-карбонатными и терригенно-красноцветными породами кембрия, а также терригенно-угленосными отложениями юрской системы, залегающими пологонаклонно [Ovchinnikov et al., 1999].

Основные проявления поверхностного и подземного карста в данном районе приурочены к гипс-ангидрит-доломитовым породам ангарской свиты (E_{1an}) [Filippov, Trzhtsinsky, 1984]. Здесь наблюдается переслаивание брекчированных сильно кавернозных доломитов с плотными, крепкими разностями пород.

На контакте верхоленской и ангарской свит в толще сульфатно-карбонатных отложений встречены линзы чистого гипса мощностью 3–7 м. Карстующиеся породы залегают на абсолютных отметках 380–400 м, что соответствует зонам переменного и верхней части зоны полного насыщения. Такое положение легкокарстующихся пород в гидродинамическом разрезе в пределах распространения подпора и колебания уровня подземных вод стимулирует высокие скорости выщелачивания и активизацию карста.

Красноцветные терригенные отложения верхоленской свиты ($E_{2,3vl}$) представлены интенсивно трещиноватыми брекчиевидными мергелями, реже – аргиллитами. Сульфаты здесь присутствуют в виде тонких прослоев гипса и рассеянной гипсоносности.

Четвертичные отложения покрывают коренные породы сплошным чехлом мощностью 5–7 м, достигая в понижениях карстового микрорельефа 15–20 м. Они представлены делювиальными лессовидными суглинками и супесями, которые засолены, насыщены карбонатами и сульфатом кальция. Таким образом, процессы выщелачивания в различной степени затрагивают все представленные стратиграфические подразделения.

Существенное значение в тектонике территории принадлежит дизъюнктивным нарушениям. В пределах исследуемой территории развиты две системы региональной тектонической трещиноватости северо-западного 310–340° (саянского) и северо-восточного 30–50° (байкальского) направления и приуроченные к ней проявления карстовых, карстово-суффозионных, карстово-оползневых и карстово-эрозионных форм. Так, например, на карте выделяется линия с цепочкой карстовых воронок, маркирующая тектоническую зону северо-восточного простираения (рис. 2). Это направление взаимно перпендикулярно линии суходолов, образующих узкие хвостообразные заливы и демонстрирующих северо-западную сеть тектонических нарушений регионального плана. Другая серия карстово-суффозионных воронок формирует новый оползневой ров на левой стрелке залива Шалоты [Kozyreva, 2019]. Смещение оползневых ступеней происходит по слою выщелоченных сульфатно-карбонатных пород, находящихся в зоне переменного водонасыщения.

Наличие тектонических нарушений, к которым приурочены зоны провалов, подтверждается результатами комплекса геофизических методов (магнитная съемка с БПЛА, электротомография) [Chasovitin et al., 2025]. На геоэлектрическом разрезе зона произошедшего провала совпадает с осью разломной зоны. Под провалом на глубине 50–60 м фиксируется кровля проводящего тела – предполагаемая область карстового провала.

Эти данные согласуются с результатами буровых работ, выполненных в 1980-х гг. вблизи крупного карстового провала, образовавшегося на пашне в мае 1983 г. (глубина – 38 м, диаметр – 13.5 м) (см. рис. 1). Бурение скважины вблизи провала выявило кровлю

карстующихся пород на глубине 62 м, уровень подземных вод на глубине 37 м) [Litvin et al., 1996].

Среди различных типов трещин особое значение для развития сульфатно-карбонатного карста имеют трещины напластования практически моноклиально залегающих пород, трещины отседания, трещины выветривания, служащие основными путями фильтрации подземных вод. По материалам В.М. Филиппова [Filippov, 1983] при выщелачивании гипсов первостепенное значение имеют структурно-текстурные признаки, наличие микротрещин, включение терригенного материала. Процессы растворения гипсов по трещинам напластования можно наблюдать в береговом уступе, где в обнажениях выходят породы литвинцевской свиты нижнего – среднего кембрия. Интенсивность растворения столь высока, что за один сезон стояния вод на высоких отметках по сети тектонической и литологической трещиноватости формируются объемные полости (рис. 3). Параметры таких ниш и пустот зависят от состава вмещающих пород и варьируются в широких пределах: от первых миллиметров до 1.2 м в ширину и от 0.5 до 6.0 и более метров в глубину [Ovchinnikov et al., 1999].

3.2. Уровень Братского водохранилища

На берегах водохранилищ при условии сезонных и многолетних колебаний уровня воды создаются благоприятные условия для активизации геологических процессов [Bolin et al., 2021; Yin et al., 2016; Kaczmarek et al., 2016; Mazaeva et al., 2019], включая карстовый и суффозионный [Pecherkin, 1969; Ovchinnikov et al., 1999; Nazarov, 2004; Milanović et al., 2019].

Среди водохранилищ Ангарского каскада ГЭС Братское выделяется глубиной сработки уровня воды до 10 м. Подобные максимальные понижения уровня в

период эксплуатации происходили неоднократно, вызывая существенную активизацию экзогенных геологических процессов в береговой зоне [Ovchinnikov et al., 1999]. После наполнения Братского водохранилища реакцией карстовых массивов на изменения гидродинамической и гидрохимической обстановки была скачкообразная активизация карстово-суффозионного процесса. Карстующиеся породы, залегающая на отметках 380–400 м, попали в зону активного влияния подпора Братского водохранилища. В результате чего только на левобережном участке протяженностью 10 км за период с мая по август 1966 г. образовалось до 200 провалов диаметром от 2 до 10 м. Наиболее крупные из них установлены на расстоянии 300–700 м от берега. В дальнейшем интенсивность провалообразования снизилась, приобретя пульсирующий характер, согласующийся с уровнем режимом эксплуатации водохранилища. До настоящего времени образование воронок и провалов наблюдается практически ежегодно. Сульфатно-карбонатный карст наиболее опасен в полосе проникновения поверхностных вод в береговые массивы Братского водохранилища, в районе Хадахан-Мельхитуйского массива ширина этой зоны достигает 6 км.

Масштабные провалы на пахотных угодьях и активизация деформаций в пределах Хадахан-Мельхитуйского массива фиксировались в 1976, 1977 гг., в конце 1970-х, весной 1983, а также в 1990 г.

В 1983 г. В.М. Филипповым на участке Хадахан-Мельхитуй было зафиксировано 387 воронок, при этом 203 из них имели провальное происхождение. К этому моменту за 15-летний период эксплуатации Братского водохранилища в зонах подпора и аэрации за счет современной коррозии не могли сформироваться новые крупные полости, способные вызвать обрушение



Рис. 3. Ниши, сформированные в результате абразии и растворения пород по трещинам напластования в береговой зоне.
Fig. 3. Coastal niches resulting from combined shore erosion and differential dissolution of rocks along bedding joints.

поверхности. В связи с этим был сделан вывод, что роль текущих процессов растворения минимальна, а их морфологические проявления возможны преимущественно в сульфатных породах [Filippov, Trzhtsin-sky, 1984].

По состоянию на 1999 г. сообщалось, что с момента заполнения водохранилища активность карста имеет тенденцию к росту – как за счет расширения зоны активизации, так и вследствие вовлечения новых участков [Ovchinnikov et al., 1999]. В период мониторинга 2000–2015 гг. было зафиксировано еще 14 новых образований, а также отмечено обновление ранее существовавших форм [Kozyreva, 2019].

Сравнительный анализ разновременных аэрофотоснимков 06.2021–05.2024 гг. выявил на исследуемой площади карстового массива образование трех новых провалов (см. рис. 1, б).

С учетом того, что ко времени катастрофического провала с момента наполнения водохранилища в 1967 г. прошло 57 лет, вполне реально предположить возможность формирования новых подземных полостей выщелачивания.

Провал, зафиксированный 19 сентября 2024 г., сформировался в зоне влияния подпора водохранилища, где разупрочнению грунтов способствовало длительное замачивание. С 2021 г. уровень воды в водохранилище (с учетом сезонных колебаний) сохраняется на высоких отметках, близких к нормальному подпорному уровню (НПУ) (рис. 4).

3.3. Комплексная оценка покрывающей толщи

По результатам натурного обследования и съемки с применением БПЛА, выполненных авторами 23 сентября 2024 г., установлены следующие параметры

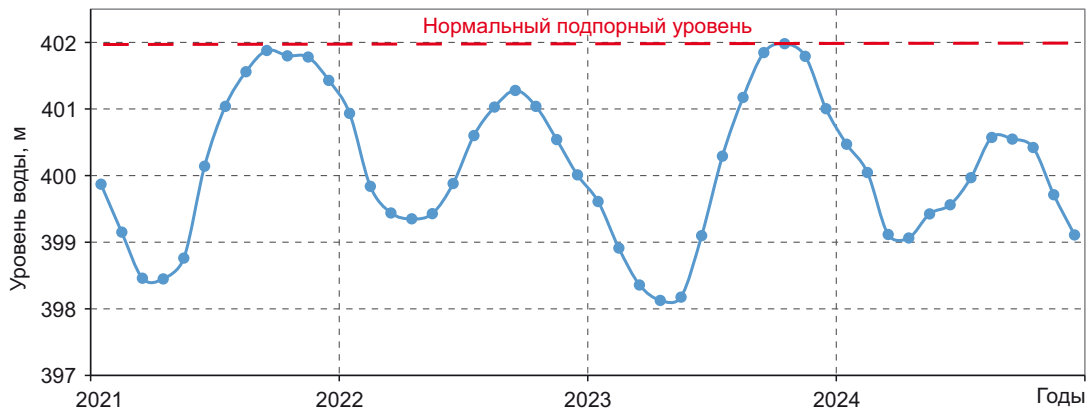


Рис. 4. Колебания уровня воды в Братском водохранилище в 2021–2024 гг. (по данным Русгидро).

Fig. 4. Water level fluctuations in the Bratsk Reservoir from 2021 to 2024 (according to RusHydro data).

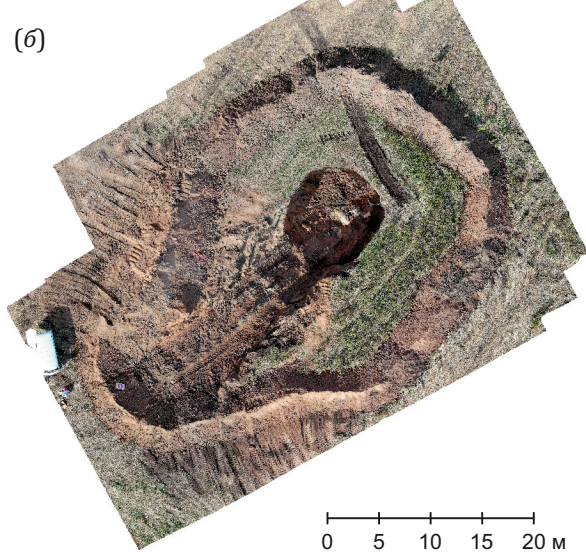


Рис. 5. Вид карстово-суффозионного провала (19.09.2024 г.): (а) – обзорная фотография провала; (б) – ортофотоплан участка (по данным БПЛА).

Fig. 5. View of the karst-suffosion sinkhole (September 19, 2024): (a) – overview photo of the sinkhole; (b) – orthophoto map of the site based on UAV data.

провала: форма в плане – овальная, профиль – колодеобразный; размеры составляют 10.2×8.8 м, глубина – 9.7 м. Площадь объекта достигает 69 м², а объем вовлеченных в провал пород – 412 м³ (рис. 5).

Сравнительный анализ морфометрических характеристик данного провала с результатами карстовых съемок 1983 г. на Хадахан-Мельхитуйском массиве показал его уникальность для региона. Так, из 199 «свежих» провалов, зафиксированных в 1983 г., диаметр в диапазоне 7.5–10.0 м имели лишь 30 объектов (15 %), глубину более 9.5 м – только 10 (5 %), а по объему сопоставимой была лишь одна воронка из всей выборки [Filippov, 1988].

Выявленный по результатам дешифрирования аэрофотоснимков исследуемой территории бугристо-западинный микрорельеф традиционно связывается с просадочностью покровных лессовидных толщ. Однако такой рельеф мог образовываться и при деградации многолетней мерзлоты. Наличие в покровных отложениях полигонально-блочных структур может указывать на вклад реликтового криолитогенеза в формирование их первичной трещиноватости, которая в современных условиях может служить каналами концентрированной фильтрации подземных вод и тем самым ускорять развитие суффозии.

В разрезе стенки карстово-суффозионного провала коренные породы не вскрыты (рис. 6). Мощность покровных рыхлых отложений, представленных делювиальными лессовидными суглинками и супесями, составила 9.7 м.

Анализ результатов комплексных лабораторных исследований состава, структуры и свойств отложений покрывающей толщи позволил выявить ряд общих и отличительных особенностей. По гранулометрическому составу они представлены несколькими литологическими разновидностями: супесь (легкая,

тяжелая), супесь пылеватая (легкая, тяжелая) и суглинок пылеватый (легкий, средний) (рис. 7). Отмечается существенное преобладание пылеватой фракции (в среднем 68 %, диапазон 15–84 %), при этом большая часть приходится на крупнопылеватую (0.05–0.01 мм) со средним содержанием 49 % (23–66 %).

Верхняя часть разреза стенки провала (0–6.5 м) сложена пылеватыми макропористыми суглинками (преимущественно легкими); количество пылеватой фракции (0.050–0.002 мм) варьируется от 47 до 84 %. Нижняя часть (6.5–9.7 м) представлена пылеватыми супесями (в основном тяжелыми), содержащими включения дресвяно-щебенистого материала сульфатных и карбонатных пород. Доля пылеватой фракции здесь составляет преимущественно от 35 до 79 %.

Минеральный состав грунтов достаточно однороден и представлен следующими минералами: кварц (35–40 %), плагиоклаз (15–20 %), кальцит (5–17 %), калиевый полевой шпат (5–15 %), амфибол (от следов до 7 %) и глинистые минералы (от 5–10 до 25 %). В составе глинистой фракции присутствует хлорит, смектит, иллит, реже – каолинит и смешанослойные минералы (ССМ) типа хлорит-смектит и иллит-смектит.

Грунты характеризуются хлоридно-сульфатным типом засоления различной степени (от незасоленных до средnezасоленных – $S_{вр} = 0.20–0.89\%$), обогащены карбонатами ($S_{кр} = 11.19–24.93\%$) с преобладанием железистых форм ($FeCO_3 = 4.18–19.32\%$) и аморфными полуторными оксидами ($R_2O_3 = 7.6–13.8\%$).

Параметры физического состояния грунтов имеют в основном неоднородное распределение по разрезу. Выявлен широкий диапазон значений природной плотности ($\rho = 1.04–1.71\text{ г/см}^3$), плотности скелета грунта ($\rho_d = 0.91–1.68\text{ г/см}^3$), пористости ($n = 37–64\%$) и коэффициента пористости ($e = 0.6–1.8$). Исключение составляет показатель консистенции (I_L). Практически все

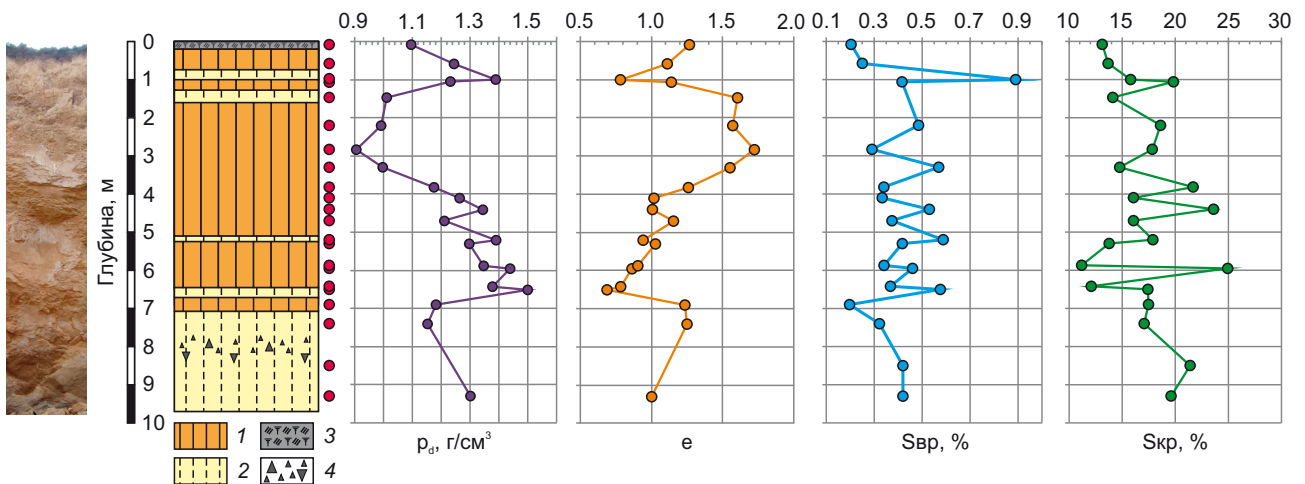


Рис. 6. Разрез стенки карстово-суффозионного провала и графики изменения плотности скелета грунта (ρ_d), коэффициента пористости (e), содержания водорастворимых солей ($S_{вр}$) и карбонатов ($S_{кр}$) по глубине. 1 – лессовидные суглинки; 2 – лессовидные супеши; 3 – почвенно-растительный слой; 4 – включения обломков дресвяной и щебенистой размерности.

Fig. 6. Cross-section of the karst-suffosion sinkhole wall and depth profiles of dry density (ρ_d), void ratio (e), water-soluble salt content (S_{ws}), and carbonate content (S_{cr}). 1 – loess-like loams; 2 – loess-like sandy loams; 3 – topsoil; 4 – gravel and grus inclusions.

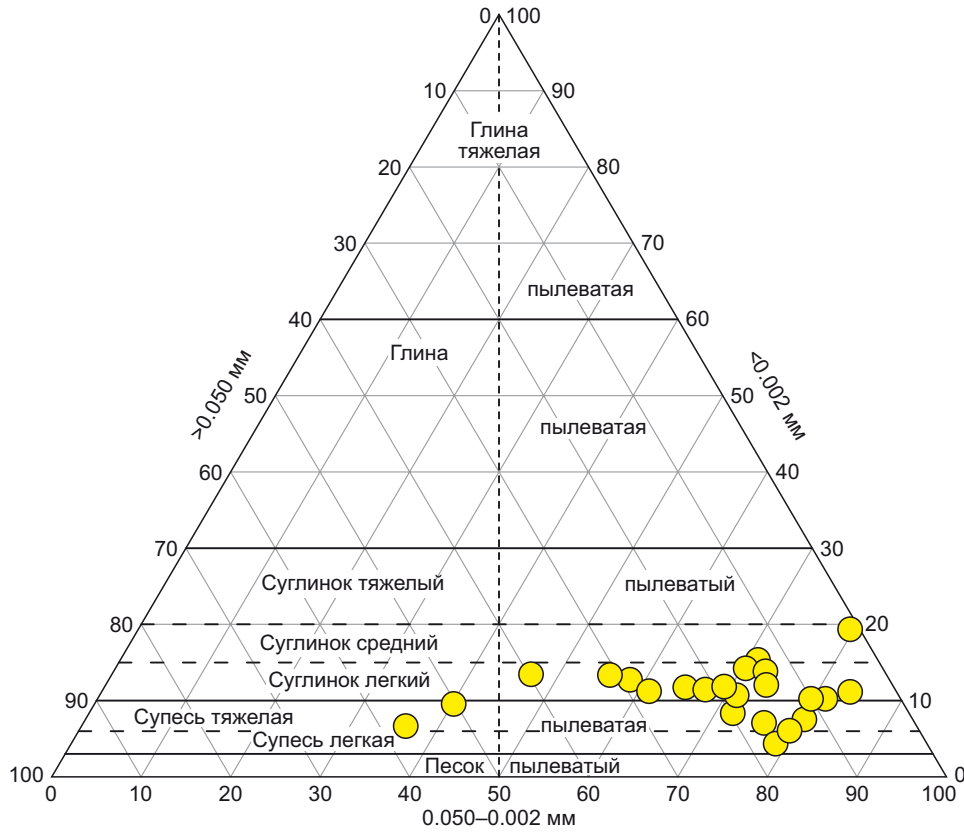


Рис. 7. Треугольная классификационная диаграмма отложений по гранулометрическому составу (по [Okhotin, 1933; Ivanov, 1990]).

Fig. 7. Triangular classification diagram of sediments by granulometric composition (after [Okhotin, 1933; Ivanov, 1990]).

грунты находятся в твердом состоянии ($I_L < 0$). Наличие anomalно низких значений плотности скелета грунта при повышенной пористости указывает на недоуплотненное (или разууплотненное) состояние отдельных слоев в разрезе толщи. Для них обычно характерна повышенная макропористость и трещиноватость (рис. 8).

Анализ физико-химических характеристик выявил специфические особенности исследуемых отложений. Значения числа пластичности ($I_p = 2.3-6.8\%$) формально классифицируют данные грунты как супеси. Однако пределы текучести (W_T) и пластичности (W_p) варьируются в anomalно широких для данного типа грунта диапазонах: от 20.5 до 40.7 % и от 18.5 до 33.9 % соответственно. Такое сочетание свойств может быть объяснено присутствием разного количества высокодисперсных глинистых минералов (смектита и ССМ), обуславливающих высокую гидрофильность и влагоемкость грунтов. В то же время доминирование крупнопылеватой фракции (0.05–0.01 мм) ограничивает диапазон пластичного состояния. Подобная специфика характерна для лессовидных грунтов, обладающих низкой пластичностью при значительном потенциале водонасыщения. Вследствие малых значений числа пластичности показатель консистенции грунта (I_L) проявляет повышенную чувствительность даже к незначительным изменениям влажности. Это также отра-

жается на особенностях проявления грунтами таких свойств, как набухаемость ($E_{sw} = 2-19\%$) и усадка ($\delta_v = 15-31\%$), при этом в процессе усадки происходит растрескивание грунта. В условиях циклического увлажнения и высыхания (сезонных или техногенных) трещины формируются уже в самом массиве, что приводит к его ослаблению [Liu et al., 2023; Lu et al., 2024].

Характерной чертой лессовидных грунтов является их слабая водопрочность. Полное размокание большинства образцов происходит в первые минуты, при этом максимальное время не превышает 10 мин, что говорит о мгновенном или очень быстром характере их разрушения при контакте с водой.

По результатам испытаний методами одноплоскостного среза и трехосного сжатия для образца ненарушенной структуры ($W = 16\%$, $\rho_d = 1.68\text{ г/см}^3$, $n = 37\%$, $e = 0.60$), отобранного с глубины 6 м, установлены следующие значения деформационно-прочностных параметров: удельное сцепление (c) – 0.05 МПа, угол внутреннего трения (φ) – 35°, модуль общей деформации (E) – 3.3 МПа. Несмотря на то, что отложения данного горизонта можно охарактеризовать как «очень сильно деформируемые глинистые грунты средней прочности», стоит учитывать, что в момент обрушения они находились в твердом состоянии ($I_L = -1.2$). Этот вывод согласуется с результатами лабораторного моделирования карстовых провалов в покровной толще методом

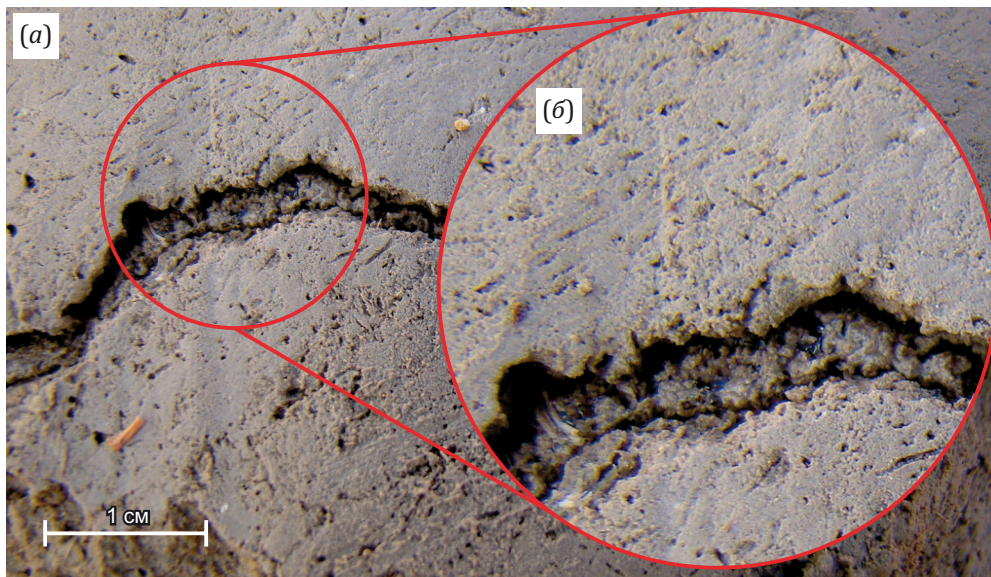


Рис. 8. Макроструктура грунтов, характерная для верхней части разреза карстово-суффозионного провала. (а) – внешний вид образца пылеватого суглинка (глубина отбора 0.6 м); (б) – вид поверхности образца с макропористостью и трещиноватостью.

Fig. 8. Macrostructure of soils typical of the upper part of the karst-suffosion sinkhole section. (a) – general view of the silty loam sample (sampling depth 0.6 m); (b) – detailed view of the sample surface demonstrating macroporosity and cracking.

качественного подobia, отражающих ее деформации с момента обрушения кровли карстовой полости до развития провала на дневной поверхности [Neshchetkin, 2017].

Критическая роль состава, структуры и свойств исследуемых отложений определяется высокой пылеватостью, карбонатностью и пористостью в сочетании с низкой плотностью скелета и мгновенной потерей связности при увлажнении. Таким образом, они являются благоприятной средой для развития суффозионных и просадочных процессов.

3.4. Механизм карстово-суффозионного провала

С учетом всех перечисленных условий и факторов можно предположить следующий двухстадийный механизм формирования провала 19.09.2024 г.

Под толщей лессовидных отложений в коренных карстующихся породах (известняки, доломиты, гипсы) в течение 57 лет эксплуатации Братского водохранилища происходит обновление уже существующей карстовой полости или формирование новой (первая стадия). Сезонное и многолетнее изменение гидрогеологического режима приводит к фильтрации воды в сторону данной полости и активизации суффозии. Пылеватые частицы покрывающей толщи выносятся в полость, в результате в ней формируется разуплотненная зона. Далее происходит образование и рост подземной полости уже в самой покрывающей толще (вторая стадия).

Слабая структурная прочность отложений, обусловленная рядом выявленных особенностей (высокая пылеватость, разнородное распределение параметров фи-

зического состояния, твердая консистенция, наличие карбонатных и водорастворимых солей и др.), может привести к мгновенному обрушению всего свода. В таком случае свод можно считать не пластичным, а хрупким. При таком сценарии должны отсутствовать какие-либо длительные предвестники (проседания земной поверхности). В случае дополнительной нагрузки провал, образованный в таких отложениях, должен иметь внезапный (обвалный) характер.

Спрогнозированное поведение массива грунта в целом соответствует сценарию катастрофического провала 19 сентября 2024 г. в Нукутском районе. В период зерноуборочных работ в ходе движения комбайна под ним произошло обрушение грунтовой толщи и формирование карстово-суффозионного провала, приведшее к гибели комбайнера.

Вероятной причиной его образования стало взаимодействие карстового и суффозионного процессов, обусловленное длительным выщелачиванием карстующихся пород в зоне действия подпора водохранилища, а также суффозионным выносом пылеватых частиц из покрывающей лессовидной толщи с последующим постепенным обрушением свода полости в ней. Триггером, вызвавшим обрушение свода карстовой полости, стала дополнительная нагрузка от веса тяжелой сельскохозяйственной техники.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексного исследования катастрофического провала на Хадахан-Мельхитуйском карстовом массиве (левый берег Братского водохранилища) выявлен механизм взаимодействия карстовых и

суффозионных процессов, приводящий к внезапному провалообразованию.

По результатам аэрофотосъемки с применением БПЛА построена цифровая модель рельефа и установлены параметры провала: форма в плане – овальная, профиль – колодцеобразный, размеры – 10.2×8.8 м, глубина – 9.7 м, площадь – 69 м², объем вовлеченных в провал пород – 412 м³.

Детальный анализ состава, строения, состояния и свойств лессовидных суглинков и супесей покрывающей толщи показал, что они обладают критически низкой устойчивостью: высокая пылеватость, сильная недоуплотненность и мгновенная размокаемость определяют их склонность к быстрой потере несущей способности при увлажнении и дополнительных нагрузках.

Совпадение зоны карстово-суффозионного провала с осью тектонического нарушения указывает на структурный контроль данного процесса, являющийся индикатором гидродинамических условий, обеспечивающих ускоренное растворение закарстованных пород, и тем самым предопределяя место провала.

Установлено, что исследуемый провал имеет смешанный карстово-суффозионный генезис. Его формирование обусловлено уникальным сочетанием литологических факторов (наличие закарстованных трещиноватых пород, покрытых толщей лессовидных отложений) и гидрогеологических условий, измененных длительным (около 60 лет) влиянием подпора Братского водохранилища.

Основным катализатором карстово-суффозионного процесса выступает нестабильный гидрологический режим водохранилища (в пределах зоны влияния подпора и колебаний уровня подземных вод). Провалу предшествовало длительное обводнение закарстованных пород: с 2021 г. уровень воды в водохранилище (с учетом сезонных колебаний) сохранялся на высоких отметках, близких к НПУ, в 2024 г. произошло его снижение.

Выявлен двухстадийный механизм формирования карстово-суффозионного провала. На первой (длительной) стадии происходит выщелачивание растворимых коренных пород, что создает дренирующие каналы для последующей нисходящей суффозии пылеватых частиц из вышележащих лессовидных отложений. На второй (мгновенной) – хрупкое обрушение свода скрытой полости покрывающей толщи. Непосредственным триггером, вызвавшим мгновенное обрушение свода, стала дополнительная вертикальная нагрузка от веса двигавшегося комбайна.

Незатухающая активизация карстово-суффозионных процессов на юге Братского водохранилища представляет опасность местных жителей, сельхозугодий и населенных пунктов.

Результаты исследования подтверждают необходимость дальнейшего внедрения методов дистанционного и геофизического мониторинга на сельскохозяйственных землях Южного Приангарья в зоне влияния

водохранилищ для оперативного контроля их состояния и предотвращения подобных катастрофических событий в будущем.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны ведущему инженеру ИЗК СО РАН Ю.С. Тарасовой за помощь при проведении полевых работ.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

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

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

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

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

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Agisoft Metashape, 2022. Professional Edition, Version 1.8.5. User's Manual. 118 p. Available from: <https://www.agisoft.com> (Last Accessed February 25, 2026).

Arinushkina E.V., 1970. Guideline for Chemical Analysis of Soils. MSU, Moscow, 488 p. (in Russian) [Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 488 с.].

Bolin H., Yueping Y., Guoqiang Y., Bin L., Zhen O., Jian W., 2021. A Study on in Situ Measurements of Carbonate Rock Mass Degradation in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir, China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 80 (2), 1091–1101. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01990-w>.

Brown G. (Ed.), 1965. The X-Ray Identification and Crystal Structures of Clay Minerals. Mir, Moscow, 599 p. (in Russian) [Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов / Ред. Г. Браун. М.: Мир, 1965. 599 с.].

Chasovitin P.A., Zhukova A.I., Buddo I.V., Shelokhov I.A., Chernykh A.A., 2025. The Potential of a Complex of Geophysical Research in Predicting Ground Collapse in the Nukutsky District of the Irkutsk Region. In: Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent). Proceedings of Scientific Meeting (October 14–18, 2025). Iss. 23. IEC SB RAS, Irkutsk, p. 244–245 (in Russian) [Часовитин П.А., Жукова А.И., Буддо И.В., Шелохов И.А., Черных А.А. Возможности комплекса геофизических исследований при прогнозе провалов грунта в Нукутском районе Иркутской области // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции (14–18 октября 2025 г.). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2025. Вып. 23. С. 244–245].

De Waele J., Gutiérrez F., Parise M., Plan L., 2011. Geomorphology and Natural Hazards in Karst Areas: A Review. *Geomorphology* 134 (1–2), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.001>.

Dublyansky V.N. (Ed.), 2004. *Karstology – XXI Century: Theoretical and Practical Significance. Proceedings of the International Symposium (May 25–30, 2004)*. Perm State University, Perm, 384 p. (in Russian) [Карстоведение – XXI век: теоретическое и практическое значение: Материалы международного симпозиума (25–30 мая 2004 г.) / Ред. В.Н. Дублянский. Пермь: ПГНИУ, 2004. 384 с.].

Filippov V.M., 1983. Dynamics, Activation and Prediction of Karst in the Angara Reservoirs. *Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Irkutsk*, 343 p. (in Russian) [Филиппов В.М. Динамика, активизация и прогноз карста ангарских водохранилищ. Иркутск: СО АН СССР, 1983. 343 с.].

Filippov V.M., 1988. Dynamics of Karst in the Influence Zone of the Angara Reservoirs. PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 253 p. (in Russian) [Филиппов В.М. Динамика карста зоны влияния ангарских водохранилищ: Дис. ... к.г.-м.н. Иркутск, 1988. 253 с.].

Filippov V.M., Trzhtsinsky Yu.B., 1984. Recommendations for National-Economic Use of Shore Zone of Angara Cascade Reservoirs in Karst Areas. *Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Irkutsk*, 72 p. (in Russian) [Филиппов В.М., Тржцинский Ю.Б. Рекомендации по народно-хозяйственному использованию побережий Ангарских водохранилищ в зоне развития карста. Иркутск: СО АН СССР, 1984. 72 с.].

Ford D.C., Williams P.W., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, 576 p. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>.

Furlani S., Cucchi F., Forti F., Rossi A., 2009. Comparison Between Coastal and Inland Karst Limestone Lowering Rates in the Northeastern Adriatic Region (Italy and Croatia). *Geomorphology* 104 (1–2), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.015>.

Goldscheider N., Chen Z., Auler A.S., Bakalowicz M., Broda S., Drew D., Hartmann J., Jiang G., Moosdorf N., Stevanovic Z., Veni G., 2020. Global Distribution of Carbonate Rocks and Karst Water Resources. *Hydrogeology Journal* 28 (5), 1661–1677. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>.

Guo F., Tang D. (Eds), 2003. *World Correlation of Karst Ecosystem Newsletter. Proceedings of the IGCP-448 Symposium "Human Impact and Karst Ecosystem of Eastern Siberia" (July 6–13, 2003, Irkutsk, Russia)*. Guangxi normal University Press, Guilin, 129 p.

Gutiérrez F., Parise M., De Waele J., Jourde H., 2014. A Review on Natural and Human-Induced Geohazards and Impacts in Karst. *Earth-Science Review* 138, 61–88. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>.

Gvozdetsky N.A., 1954. *Karst Questions of General and Regional Karst Studies*. Geografiz, Moscow, 352 p. (in Russian) [Гвоздецкий Н.А. Карст: вопросы общего и регионального карстоведения. М.: Географиз, 1954. 352 с.].

Hubbard C.R., Snyder R.L., 1988. RIR – Measurement and Use in Quantitative XRD. *Powder Diffraction* 3 (2), 74–77. <https://doi.org/10.1017/S0885715600013257>.

Ivanov I.P., 1990. *Engineering Geology of Mineral Deposits*. Nedra, Moscow, 302 p. (in Russian) [Иванов И.П. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 302 с.].

Ivanov I.P., Trzhtsinsky Y.B., 2001. *Engineering Geodynamics*. Nauka, Saint Petersburg, 416 p. (in Russian) [Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика. СПб.: Наука, 2001. 416 с.].

Kaczmarek H., Mazaeva O.A., Kozyreva E.A., Babicheva V.A., Tyszkowski S., Rybchenko A.A., Brykała D., Bartczak A., Słowiński M., 2016. Impact of Large Water Level Fluctuations on Geomorphological Processes and their Interactions in the Shore Zone of a Dam Reservoir. *Journal of Great Lakes Research* 42 (5), 926–941. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.07.024>.

Khomenko V.P., 1986. *Karst-Suffusion Processes and Their Prediction*. Nedra, Moscow, 97 p. (in Russian) [Хоменко В.П. Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. М.: Наука, 1986. 97 с.].

Khomenko V.P., 2020. Geomorphological Technogenesis Related to Phreatic Piping-Collapse Sinkhole Formation. *Geocology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology* 2, 10–15 (in Russian) [Хоменко В.П. Геоморфологический техногенез, связанный с карстово-суффозионным провалообразованием фреатического типа // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 2. С. 10–15]. <https://doi.org/10.31857/S0869780920020058>.

Klimchouk A., Evans D., Milanovic S., Bittencourt C., Sanchez M., Aguirre F.C., 2023. Hypogene Speleogenesis Related to Porphyry Magmatic Intrusions and Its Influence on Subsequent Karst Evolution in the Peruvian High Andes. *Geomorphology* 420, 108488. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108488>.

Kozyreva E.A., 2019. *Exogeodynamics of Large Natural-Technical Systems of the Mongolian-Siberian Region*. PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 290 p. (in Russian) [Козырева Е.А. Экзогеодинамика крупных природно-технических систем Монголо-Сибирского региона: Дис. ... д.г.-м.н. наук. Иркутск, 2019. 290 с.].

Krasheninnikov V.S., Khomenko V.P., 2011. The Research of an Overburden as One of Important Parts of Site Investigations in Covered Karst Areas. *Vestnik MGSU* 5, 113–119 (in Russian) [Крашенинников В.С., Хоменко В.П. Изучение покрывающей толщи как один из важнейших компонентов инженерных изысканий в районах покрытого карста // Вестник МГСУ. 2011. № 5. С. 113–119].

Krasheninnikov V.S., Khomenko V.P., 2013. Covered Karst: Necessary Conditions, Reasons and Signs of Sinkhole Formation. *Industrial and Civil Engineering* 11, 13–15 (in Russian) [Крашенинников В.С., Хоменко В.П. Покрытый карст: необходимые условия, причины и признаки подготовки провалообразования // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 11. С. 13–15].

Krashennnikov V.S., Khomenko V.P., 2017. Changing Noncohesive Soil Granulometric Composition that Precedes Karst-Piping Sinkhole Formation. *Engineering Geology World* 2, 52–63 (in Russian) [Крашенинников В.С., Хоменко В.П., Изменение гранулометрического состава несвязных грунтов, предшествующее карстово-суффозионному провалообразованию // *Инженерная геология*. 2017. № 2. С. 52–63].

Li J., Yuan D., Liu J., Ma M., Li Y., 2023. Evaluating the Effects of Water Exchange between Surface Rivers and Karst Aquifers on Surface Flood Simulations at Different Watershed Scales. *Journal of Hydrology* 623, 129851. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129851>.

Liang Y., Gao X., Zhao C., Tang C., Shen H., Wang Z., Wang Y., 2018. Review: Characterization, Evolution, and Environmental Issues of Karst Water Systems in Northern China. *Hydrogeology Journal* 26 (5), 1371–1385. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1792-4>.

Litvin V.M., 1991. Experience in Regional Assessment of Intensity of Exogenous Geological Processes in South of East Siberia. *Engineering Geology* 6, 72–81 (in Russian) [Литвин В.М. Опыт региональной оценки интенсивности проявления экзогенных геологических процессов на юге Восточной Сибири // *Инженерная геология*. 1991. № 6. С. 72–81].

Litvin V.M., Akulova V.V., 2004. Assessment of the Stability of Karst-Suffosion Geosystems in the South of Eastern Siberia. In: *Sergeev Readings. Engineering Geology and Geological Environmental Protection. Current State and Prospects for Development. Proceedings of the Annual Session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Problems of Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology (March 23–24, 2004)*. GEOS, Moscow, p. 156–160 (in Russian) [Литвин В.М., Акулова В.В. Оценка устойчивости карстово-суффозионных геосистем юга Восточной Сибири // *Сергеевские чтения. Инженерная геология и охрана геологической среды. Современное состояние и перспективы развития: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (23–24 марта 2004 г.)*. М.: ГЕОС, 2004. С. 156–160].

Litvin V.M., Pavlov S.Kh., Trzhtinsky Yu.B., 1996. Karst Regions of the Forest-Steppe Priangarie. In: *Guidebook to Selected Karst Regions of Eastern Siberia and the Urals*. Silesian University Press, Sosnowiec, p. 11–25 (in Russian) [Литвин В.М., Павлов С.Х., Тржцинский Ю.Б. Карстовые районы лесостепного Приангарья // *Путеводитель по отдельным карстовым районам Восточной Сибири и Урала*. Сосновец: Изд-во Силезского университета, 1996. С. 11–25].

Litvin V.M., Trzhtinsky Y.B., 1993. Assessment of the Intensity of Exogenous Geological Processes (EGP). In: *Problems of Geological Environment Protection (Case Study of Eastern Siberia)*. Nauka, Novosibirsk, p. 46–49 (in Russian) [Литвин В.М., Тржцинский Ю.Б., Оценка интенсивности экзогенных геологических процессов (ЭГП) // *Проблемы охраны геологической среды (на примере Восточной Сибири)*. Новосибирск: Наука, 1993. С. 46–49].

Litvin V.M., Trzhtinsky Yu.B., Sharipova E.K., Saraeva E.P., Stepanov A.V., 1983. *Engineering-Geological Yearbook. Report on the Work of the Pribaikalsky Party and the Laboratory of Engineering Geology on the Study of Exogenous Geological Processes in 1982*. Vol. 7. IEC SB AS USSR, Irkutsk, 119 p. (in Russian) [Литвин В.М., Тржцинский Ю.Б., Шарипова Е.К., Сараева Е.П., Степанов А.В. *Инженерно-геологический ежегодник: Отчет о работах Прибайкальской партии и Лаборатории инженерной геологии по изучению экзогенных геологических процессов за 1982 г.* Иркутск: ИЭК СО АН СССР, 1983. Вып. 7. 119 с.].

Liu Y., Yang T., Zhang X., Zhang Q., Li X., Liu J., Deng Z., 2023. Strength Deterioration of Karst Fillings under Dry – Wet Cycles: Testing and Modeling Study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 82 (8), 339. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03347-5>.

Lu S.F., Guo X.P., Wang X.R., Han Z.J., Xu L., Huang X.L., Zuo L., 2024. Air Permeability Variation of Compacted Loess: Effects of Soil Basic Properties and Dry – Wet Cycles. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 83 (6), 234. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03709-7>.

Maksimovich G.A., 1963. *Principles of Karst Science*. Vol. I: Questions of Karst Morphology, Speleology and Karst Hydrogeology. Perm Book Publishing House, Perm, 444 p. (in Russian) [Максимович Г.А. *Основы карстологии*. Т. 1: Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Пермское книжное издательство, 1963. 444 с.].

Maksimovich N., Kadebskaya O., Meshcheriakova O., 2022. Sulfate Karst of Perm Region (Russia). Springer, Cham, 152 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-18972-2>.

Masilela M., Beckedahl H., 2022. Karst Geomorphology and Related Environmental Problems in Southern Africa – A Review. *Journal of African Earth Sciences* 196, 104686. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104686>.

Mazaeva O., Babicheva V., Kozyreva E., 2019. Geomorphological Process Development under the Impact of Man-Made Reservoir Operation, a Case Study: Bratsk Reservoir, Baikal-Angara Hydroengineering System, Russia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78 (7), 4659–4672. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1428-x>.

Milanović P., Maksimovich N., Meshcheriakova O., 2019. *Dams and Reservoirs in Evaporites*. Springer, Cham, 157 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-18521-3>.

Nazarov N.N., 2004. Karstic Coast Kama of a Water Basin: Distribution, Intensity, of Marginal Erosion, Classification. In: V.N. Dublyansky (Ed.), *Karstology – XXI Century: Theoretical and Practical Significance. Proceedings of the International Symposium (May 25–30, 2004)*. Perm State University, Perm, p. 122–130 (in Russian) [Назаров Н.Н. Карстовые берега Камского водохранилища: распространение, интенсивность переработки, классификация // *Карстология – XXI век: теоретическое и практическое значение: Материалы международного симпозиума (25–30 мая 2004 г.)* / Ред. В.Н. Дублянский. Пермь: ПГУ, 2004. С. 122–130].

Nazarov N.N., 2008. *Geodynamical Processes on Coastal Zone of Perm Region Reservoirs*. Poligrafkomplekt, Perm,

152 p. (in Russian) [Назаров Н.Н. Геодинамика побережий водохранилищ Пермского края. Пермь: Полиграф-комплект, 152 с.].

Nazarov N.N., Frolova I.V., 2009. Characteristics of the Morpholithogenesis on Karst Shores of the Kama Reservoir. *Geomorphology* 4, 92–98 (in Russian) [Назаров Н.Н., Фролова И.В. Особенности морфолитогеनेза карстовых берегов Камского водохранилища // Геоморфология. 2009. № 4. С. 92–98]. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2009-4-92-98>.

Neshchetkin O.B., 2017. Sinkhole Development Model. Part I: Modeling. *Engineering Geology World* 12 (5), 40–51 (in Russian) [Нещеткин О.Б. Механизм образования карстовых провалов. Часть 1: Моделирование // Инженерная геология. 2017. Т. 12. № 5. С. 40–51]. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2017-5-40-51>.

Okhotin V.V., 1933. Granulometric Classification of Soils on the Basis of Their Physical and Mechanical Properties. OGIZ-Lengostransizdat, Leningrad, 70 p. (in Russian) [Охотин В.В. Гранулометрическая классификация грунтов на основе их физических и механических свойств. Л.: ОГИЗ-Ленгострансиздат, 1933. 70 с.].

Ovchinnikov G.I., Pavlov S.Kh., Trzhtsin'skiy Y.B., 1999. Changes of Geological Environment in Zones of Influence of Angara-Yenisei Water Reservoirs. Nauka, Novosibirsk, 254 p. (in Russian) [Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Тржцинский Ю.Б. Изменение геологической среды в зонах влияния ангаро-енисейских водохранилищ. Новосибирск: Наука, 1999. 254 с.].

Pecherkin I.A., 1969. Geodynamics of Kama Water Storage Reservoir Shorelines. Part 2. Geological Processes. Publishing House of Perm University, Perm, 308 p. (in Russian) [Пе-

черкин И.А. Геодинамика побережий камских водохранилищ: Геологические процессы. Пермь: Изд-во Пермского университета, 1969. Ч. 2. 308 с.].

Silva O.L., Bezerra F.H.R., Maia R.P., Cazarin C.L., 2017. Karst Landforms Revealed at Various Scales Using LiDAR and UAV in Semi-Arid Brazil: Consideration on Karstification Processes and Methodological Constraints. *Geomorphology* 295, 611–630. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.025>.

Vologodsky G.P., 1975. Karst of the Irkutsk Amphitheatre. Nauka, Moscow, 123 p. (in Russian) [Вологодский Г.П. Карст Иркутского амфитеатра. М.: Наука, 1975. 123 с.].

Waltham T., Bell F.G., Culshaw M.G., 2005. Sinkholes and Subsidence. *Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Springer, Berlin, Heidelberg, 384 p. <https://doi.org/10.1007/b138363>.

Yechieli Y., Abelson M., Baer G., 2016. Sinkhole Formation and Subsidence Along the Dead Sea Coast, Israel. *Hydrogeology Journal* 24 (3), 601–612. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1338-y>.

Yin Y., Huang B., Wang W., Wei Y., Ma X., Ma F., Zhao C., 2016. Reservoir-Induced Landslides and Risk Control in Three Gorges Project on Yangtze River, China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8 (5), 577–595. <https://doi:10.1016/j.jrmge.2016.08.001>.

Zalaghaie S., Heidari M., Nikudel M.R., 2022. Evaluation of Collapse Sensitivity of Loess Soils and Its Effect on the Distribution Pattern of Pseudokarst Sinkholes at the Regional Scale (Case Study: Golestan Province, Northeastern Iran). *Natural Hazards* s 112 (3), 1883–1902. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05203-9>.