



UAV AERIAL SURVEY IN MONITORING OF COASTAL GEOSYSTEMS IN THE SOUTHERN IRKUTSK AMPHITHEATRE

O.A. Mazaeva , A.A. Yuriev , V.A. Babicheva ✉

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

ABSTRACT. Estimating the dynamics of exogenous geological processes and understanding their controlling factors is an urgent task faced by many regions of the world. One of the methods of its solution is monitoring. The paper presents the UAV monitoring results for short-term dynamics of complex exogenous processes at five key sites in the coastal zone south of the Bratsk reservoir. The study area is a part of the platform structure in the south of the Irkutsk amphitheater, which is considered to be relatively stable in terms of geodynamics. There has been developed a methodical scheme for obtaining data series on the dynamics of complex exogenous geological processes in the coastal geosystem. A flight altitude of 50–60 m is optimal to obtain orthophotos with a resolution of 1.1–2.2 cm/px, sufficient to estimate the areal dynamics of the processes, and a DEM with a resolution of 2.6–5.4 cm/px to estimate the volumetric dynamics.

The eroded coastal area at the Rassvet site was measured to be 6900 m², which corresponds to an average erosion width of 3.45 m per linear meter of coastal length with maximum values of up to 6.51 m. A high rate of coastal erosion in the period 2021–2022 is related to the maximum water level in the Bratsk reservoir, close to the normal headwater level. The assessment of the volumetric dynamics of the coastal gullies yielded negative values, as most of the gully mouths were eroded. The secondary valley-bottom gullies (Mamontov and Barany sites) and coastal gullies (Khadakhan site) are characterized by positive dynamics both in area and volume growth (12–20 m² and 1.3–35.0 m³, respectively). At the Khadakhan site, the volumetric growth of new and previously observed suffusion sinkholes was 0.45 m³.

The obtained areal and volumetric rates of the exogenous processes can serve as a basis for their modern assessment and prediction of their development in order to prevent and reduce socio-economic risks.

KEYWORDS: exogeodynamics; Bratsk reservoir; coastal erosion; gully erosion; areal and volumetric dynamics of processes

FUNDING: The work was executed as part of the base budget proposal of the Ministry of Science and Higher Education of the RF № FWEF-2021-0009 "Modern geodynamics, destruction mechanisms of the lithosphere, and hazardous geological processes in Central Asia" with the use of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust SB RAS (grant № 075-15-2021-682).



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Viktoria A. Babicheva, khak@crust.irk.ru

Received: June 27, 2023

Revised: September 10, 2023

Accepted: September 12, 2023

FOR CITATION: Mazaeva O.A., Yuriev A.A., Babicheva V.A., 2023. UAV Aerial Survey in Monitoring of Coastal Geosystems in the Southern Irkutsk Amphitheatre. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (6), 0734. doi:10.5800/GT-2023-14-6-0734

БПЛА АЭРОФОТОСЪЕМКА ПРИ МОНИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ БЕРЕГОВЫХ ГЕОСИСТЕМ ЮГА ИРКУТСКОГО АМФИТЕАТРА

О.А. Мазаева, А.А. Юрьев, В.А. Бабичева

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

АННОТАЦИЯ. Оценка темпов и понимание контролирующих факторов современной динамики развития экзогенных геологических процессов являются актуальной задачей во многих регионах мира. Один из методов получения данных для ее решения – мониторинг. В работе представлены результаты мониторинговых исследований краткосрочной динамики комплекса экзогенных геологических процессов по данным БПЛА аэрофото съемки, выполненной на пяти ключевых участках в береговой зоне юга Братского водохранилища. Исследуемая территория относится к платформенной структуре юга Иркутского амфитеатра, которая считается относительно стабильной в геодинамическом отношении. Оработана методическая схема получения рядов данных по динамике комплекса экзогенных геологических процессов в береговой геосистеме. Высота полета 50–60 м является оптимальной для получения ортофотопланов с разрешением 1.1–2.2 см/пк, достаточным для оценки площадной динамики процессов, и цифровых моделей рельефа с разрешением 2.6–5.4 см/пк – для оценки объемной динамики.

Установлено, что площадь абразионного размыва на участке Рассвет составила 6900 м², что соответствует средней ширине размыва 3.45 м на погонный метр длины берега с максимальными значениями до 6.51 м. Высокие темпы абразии за период 2021–2022 гг. связаны с максимальным уровнем воды в Братском водохранилище, близким к нормальному подпорному горизонту. Оценка объемной динамики береговых оврагов показала отрицательные значения, так как устьевые части большинства оврагов были размыты абразией. На других участках вторичные донные (Мамонтов, Бараний) и береговые (Хадахан) овраги характеризуются положительной динамикой как в площадном, так и в объемном приросте (12–20 м² и 1.3–35.0 м³ соответственно). На участке Хадахан объемный прирост новых и наблюдаемых ранее суффозионно-просадочных воронок составил 0.45 м³.

Полученные площадные и объемные скорости развития процессов могут служить основой для их современной оценки и прогноза развития с целью предотвращения и снижения социально-экономических рисков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экзогеодинамика; Братское водохранилище; абразия; овражная эрозия; площадная и объемная динамика процессов

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках базового бюджетного проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWEF-2021-0009 «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» с использованием оборудования ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН (грант №075-15-2021-682).

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из актуальных задач является снижение социально-экономических рисков от катастрофических экзогенных геологических процессов. Многочисленные чрезвычайные ситуации природно-техногенного характера, возникающие на территории Байкальского региона, наносят экономический ущерб и требуют пристального внимания [Bychkov et al., 2022]. Эрозионные процессы не представляют непосредственной угрозы для жизни человека, но относятся к процессам, негативно изменяющим условия жизнедеятельности [Krasilova, 1997]. Все разновидности эрозии наносят большой ущерб сельскому хозяйству, истощают земельные ресурсы, приводят к деградации почв, разделению и сокращению угодий, ухудшению пастбищ, деформациям транспортных и дренажных коммуникаций и инженерных сооружений [Zorina, 2006].

Оценка темпов и понимание контролирующих факторов современной динамики развития овражной эро-

зии являются актуальной задачей во многих регионах мира [Vanmaercke et al., 2016, 2021]. Один из методов получения данных для решения задачи – мониторинг. Под мониторингом экзогенных геологических процессов понимается система регулярных наблюдений за режимом процессов и прогноз их развития под воздействием природных и антропогенных факторов.

В различных областях научной и производственной деятельности широко используются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [Makarov, 2018; Rybchenko et al., 2019; Kolesatova, Krasavin, 2020; Alexeev et al., 2022; Lunina, Gladkov, 2022; Filice et al., 2022; Lunina et al., 2023; многие другие]. Имеющиеся литературные данные касаются сравнительной оценки точности моделей рельефа, получаемых с помощью БПЛА аэрофото съемки в сочетании с лазерным сканированием, лидарной, тахеометрической съемками [Gafurov, 2017; Elsner et al., 2018; Gafurov et al., 2021].

Результаты предыдущих исследований с применением БПЛА показали хорошую сходимость с тахеометрией.

Так, например, при выполнении маркшейдерских съемочных работ на открытых горных выработках с применением DJI Phantom 4 RTK + D-RTK 2 Mobile Station Combo было установлено, что все результаты фототриангуляции отвечают требованиям к точности создания планов масштаба 1:500 с сечением рельефа 0.5–1.0 м [Kolesatova, Krasavin, 2020].

Точность цифровой модели рельефа, построенной по результатам съемки ключевых участков в долине р. Сенца с применением DJI Inspire 1 pro с высоты 100 м, также была проверена и подтверждена электронным тахеометром Trimble TS635 [Alexeev et al., 2022].

На примере оврагов центра Восточно-Европейской равнины А.М. Гафуровым [Gafurov, 2017] была выполнена оценка возможности применения БПЛА для мониторинга их линейного и объемного прироста на основе построения высокоточных моделей рельефа миллиметрового разрешения при использовании опорных наземных точек с фиксированными координатами.

Кроме того, исследованиями [Gafurov et al., 2021] доказана высокая точность и корректность цифровых моделей высот (ЦМВ), построенных по результатам съемки с помощью ГНСС-БПЛА, для тестовых участков лесостепной территории Закамья Республики Татарстан. Погрешности ЦМВ находятся в пределах допустимых отклонений (согласно ГОСТ Р 58854-2020) и не превышают 5 см по осям X, Y, Z.

В 2020 г. рабочая группа Комиссии Международной ассоциации инженерной геологии (IAEG C35) «Методы и подходы мониторинга в инженерной геологии» представила обзор БПЛА и их потенциальные возможности в некоторых областях инженерной геологии, а именно сбор аэрофотоснимков опасных природных явлений, обследование оползней, оперативное картирование селевых потоков, структурный анализ и классификация массивов горных пород, картирование поверхности и трещин в естественных и открытых карьерах, анализ устойчивости склонов, мониторинг водных объектов, затопления, измерение уровня воды, мониторинг снежного покрова для изучения ледников и снижения риска наводнений, связанных с их прорывами [Giordan et al., 2020].

Таким образом, накопленный опыт применения БПЛА доказывает высокую эффективность их использования. БПЛА в настоящее время стали стандартным исследовательским инструментом, в том числе для картографирования и создания детальных 3D моделей и ортофотопланов. Однако универсальной методической технологии для решения различных задач с помощью БПЛА не существует и для каждой конкретной задачи требуется разработка индивидуальной методической схемы, т.е. детального плана и последовательности действий и процедур, которые должны быть выполнены, чтобы получить гарантированно достаточный объем точных данных. Перед авторами стояла цель отработать методическую схему получения рядов данных по динамике комплекса процессов в береговой

геосистеме с применением БПЛА для ведения мониторинга.

Полученные результаты будут служить основой для современной оценки и прогноза развития овражной эрозии с целью предотвращения и снижения социально-экономических рисков.

2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА

Квадрокоптер DJI Phantom 4 RTK – уникальная модель дрона из серии DJI Phantom 4, оснащенная модулем RTK, для выполнения геодезических, картографических и других задач. Дрон оснащен системой трехосевой активной стабилизации камеры и встроенными модулями GPS и ГЛОНАСС. С помощью дополнительного ПО (DJI GSRTK), встроенного в пульт управления дроном, пилотом осуществляется управление Phantom 4 RTK в режимах «Фотограмметрия» (2D и 3D). Это обеспечивает высокую точность и производительность: Phantom 4 RTK предоставляет данные с точностью до сантиметра с использованием небольшого количества точек маршрута.

Продольное и поперечное перекрытие снимков при съемке составило 70 % (рис. 1). Съемка на участках выполнялась преимущественно в режиме «Photogrammetry» (фотограмметрия) (2D и 3D).

Режим фотограмметрии 3D использовался:

1) для детальной съемки склоновых процессов на бортах оврагов с целью построения детальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) овражных форм и измерения их морфометрических характеристик;

2) для детальной съемки труднодоступных участков и мест повышенной опасности (высокий абразионный уступ, оползневой склон, абразионный нестабильный уступ в песчаных рыхлых отложениях и т.п.). В условиях уровня водоема 2021 и 2022 гг., приближенных к нормальному подпорному горизонту (НПГ), такими стали участки высоких и низких абразионных берегов.

Режим «BlockSegmentation» (разделение на блоки) использовался на участке Бараний и отлично подошел для детальной съемки протяженных (до 3 км) долино-балочных систем с небольшой высоты (60 м).

Режим «WaypointFlight» (полет по точкам) использовался в тестовом режиме и далее не применялся вследствие несоответствия решаемым задачам.

3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория расположена на стыке юго-западной части Лено-Ангарского моноклиналиного плато и северо-восточной краевой части Предсаянского прогиба, сложена сульфатно-карбонатными и терригенно-красноцветными породами кембрия, терригенно-угленосными породами юрской системы. После создания водохранилищ Ангарского каскада ГЭС региональное значение получила абразия береговых склонов, карст, оползни, линейная эрозия.

В соответствии с экзогеодинамическим районированием юга Восточной Сибири [Litvin, 1991] исследуемая

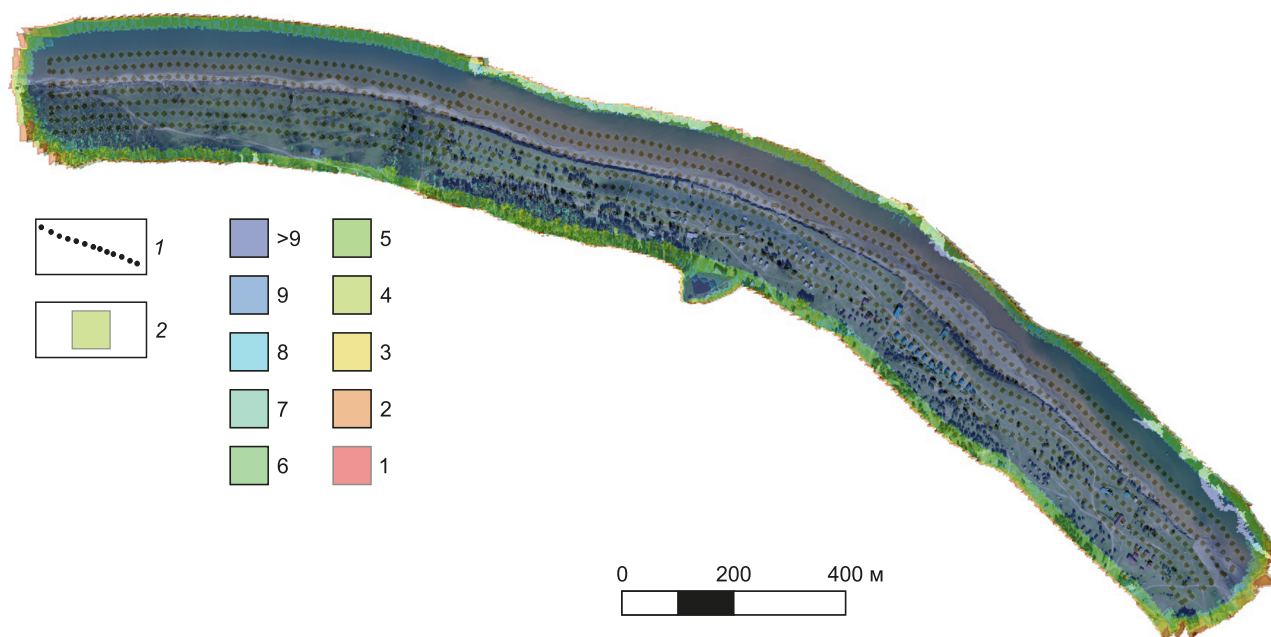


Рис. 1. Схема перекрытия снимков при съемке квадрокоптером DJI Phantom 4 RTK. 1 – положение центров фотографирования, 2 – количество перекрытий снимков (обозначено цифрами от 1 до 9 и >9).

Fig. 1. DJI Phantom 4 RTK quadcopter image overlapping scheme. 1 – photocenter positions, 2 – number of overlaps (numbered as 1 to 9 and >9).

территория относится к области средневысотного плато, характеризующегося многообразием форм проявления эрозии и интенсивности ее развития.

Объектом исследования стали различные формы проявления овражной эрозии [Mazaeva et al., 2019, 2020] (рис. 2):

- карстово-эрозионный овраг (уч. Хадахан);
- первичные овраги пологих береговых склонов на участках абразионных берегов, сложенных песчано-глинистыми грунтами (уч. Рассвет);
- вторичные донные овраги долинно-балочных систем (уч. Мамонтов, уч. Бараний);
- овраги на крутых прибрежных склонах водохранилища, сложенных терригенно-красноцветными породами кембрия и продуктами их выветривания (уч. Улей).

Участок Хадахан. На правом берегу залива Шалоты в районе распространения покрытого карста на эрозионно-денудационном склоне крутизной 10–15° наблюдается активное развитие двух карстово-эрозионных оврагов (верхний и нижний). На контакте с водохранилищем склон переходит в абразионный клиф крутизной 40°.

Средой развития карстово-эрозионных оврагов являются делювиальные суглинки мощностью до 5 м, залегающие на выветрелых сульфатно-карбонатно-гипсовых породах нижнего и среднего кембрия, находящихся в пределах зоны переменного водонасыщения и верхней части зоны полного водонасыщения. Тесная взаимосвязь уровня подземных вод с уровнем водохранилища определяет высокие скорости выщелачивания и активизацию карста зоны подпора.

Участки Мамонтов и Бараний. Овраги Мамонтов и Бараний – это вторичные донные овраги, развивающиеся в делювиально-пролювиальных отложениях днищ древних долинно-балочных систем, заложенных в породах красноцветной терригенно-карбонатной формации верхоленской свиты среднего – верхнего кембрия. Долинно-балочные системы в пределах исследуемой территории наиболее распространены на выпуклых правобережных склонах залива Унга. Их протяженность составляет от 1.5 до 7–9 км.

Участок Улей. По правобережью Осинского залива Братского водохранилища в районе участка Улей отмечается абразионно-осыпной берег, интенсивность размыва которого за период эксплуатации водохранилища с 1967 по 1996 г. составила до 20 м [Ovchinnikov et al., 1999]. Геологическое строение участка представлено песчаниками и алевролитами верхоленской свиты среднего и верхнего кембрия. Элювиально-делювиальные отложения, являющиеся средой развития эрозионных форм, имеют небольшую мощность – 2–5 м, что ограничивает развитие процесса на глубину.

Здесь развиты короткие – до 120 м – береговые склоны прямого профиля юго-западной экспозиции. На участке берега 1600 м наблюдается развитие карстовой воронки и эрозионных форм протяженностью 65–200 м. Глубина оврагов 4–6 м, поперечный профиль V-образный с крутыми бортами.

Участок Рассвет. Ключевой участок Рассвет расположен на левобережье залива Оса в области развития красноцветной терригенно-карбонатной формации нижней подсвиты верхоленской свиты среднего-верхнего кембрия. Рыхлые отложения представлены

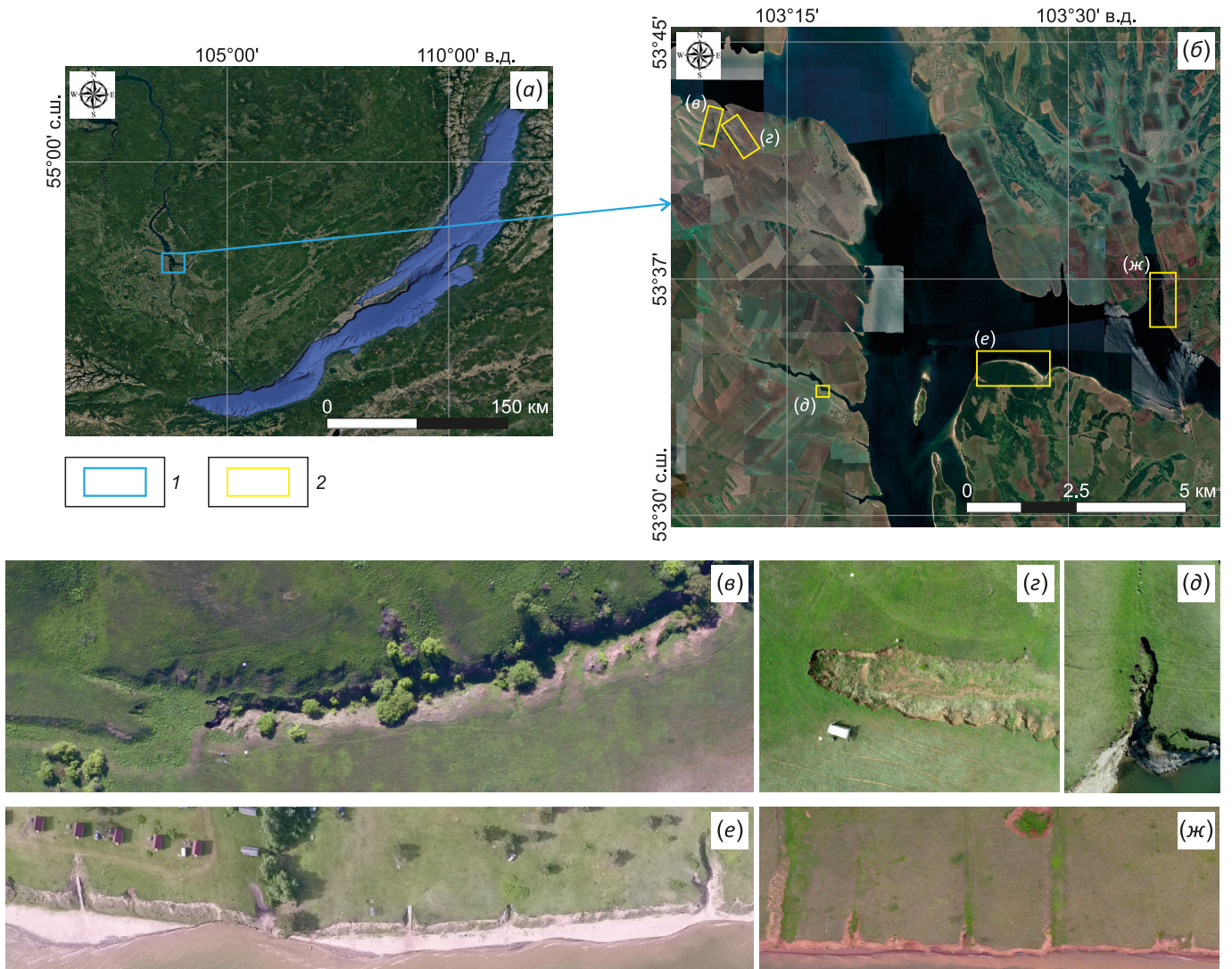


Рис. 2. Район исследования. (а) – обзорная схема; (б) – расположение ключевых участков; (е) – участок Мамонтов; (z) – участок Бараний; (д) – участок Хадахан; (е) – участок Рассвет; (ж) – участок Улей.

Fig. 2. Study area. (а) – overview scheme; (б) – location of key sites; (е) – Mamontov site; (z) – Baraniy site; (д) – Khadakhan site; (е) – Rassvet site; (ж) – Uley site.

аллювиально-делювиальными суглинками, супесями, тонкозернистыми пылеватыми песками, в береговой зоне – среднезернистым песком. Рельеф участка образован эоловыми, абразионными, эрозионными и карстовыми процессами. За время эксплуатации с 1967 по 1996 г. берег отступил максимально на 130 м [Ovchinikov et al., 1999].

На береговом склоне крутизной 2–10° протяженностью 2 км наблюдается развитие 41 эрозионной формы. Представлены они рытвинами, промоинами, небольшими оврагами, балкой. Эрозионные формы имеют небольшую протяженность, 2–30 м, в глубь берегового склона, азимут их простирания варьируется от северо-западного 315° до северо-восточного 70°. В отдельных формах в устьевых частях сформировались небольшие эоловые гряды. Мощность современных эоловых отложений выше почвенно-растительного слоя составляет 0.2–0.6 м.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Съемки были выполнены на ключевых участках Хадахан, Рассвет, Улей, Мамонтов, Бараний летом и осенью 2021–2022 гг. Стандартная схема использования БПЛА была расширена и адаптирована для аэрофотосъемки различных типов эрозионных форм и включила следующие этапы.

1. Отработка параметров съемки (высота, дальность, время полета).

Исследуемые эрозионные формы характеризуются различной протяженностью и площадью, длиной, крутизной, формой, залесенностью берегового склона, крутизной берегового уступа. В связи с этим задаваемые параметры съемки выбирались таким образом, чтобы отражать геоморфологические особенности каждой из форм проявления овражной эрозии в условиях ограниченности времени полета квадрокоптера (табл. 1).

При выполнении маркшейдерских съемочных работ на открытых горных выработках с применением DJI Phantom 4 RTK + D-RTK 2 Mobile Station Combo было установлено, что для создания планов масштаба 1:500 с сечением рельефа 0.5–1.0 м максимальная высота составила 117.04 м и оптимальной для съемки была выбрана высота 100 м [Kolesatova, Krasavin, 2020].

Исследованиями авторов установлено, что высота полета 50–60 м является оптимальной для получения ортофотопланов с разрешением 1.1–2.2 см/пк, достаточным для оценки площадной динамики процессов, и ЦМР с разрешением 2.6–5.4 см/пк – для оценки объемной динамики. Полеты с высоты 350 м выполнялись для получения обзорных ситуационных планов ключевых участков.

2. Размещение контрольных реперов на ключевых участках для повторных мониторинговых съемок.

Из общепринятых трех видов контрольных точек привязки (ground control point, GCP) [Giordan et al., 2020] были использованы естественные и искусственные. Для создания искусственной контрольной точки на ключевом участке в землю забивается железный репер. На него надевается щит, геометрия и центр которого идеально выверены и координаты которого можно измерить с высокой точностью.

В данном случае это был белый квадрат из фанеры размером 60×60 см с отверстием в центре для надевания на репер и красным крестом для центрирования (рис. 3). Но бывают другие варианты по форме и цвету [Elsner et al., 2018; Giordan et al., 2020]. Как показали проведенные полевые исследования, такой тип маркера отчетливо интерпретируется на снимках, полученных с высоты полета 60 и 350 м (рис. 4). Для уточнения



Рис. 3. Вид искусственной контрольной точки для БПЛА аэрофотосъемки ключевого участка.

Fig. 3. View of the ground control point for the UAV survey of the key site.

Таблица 1. Основные параметры БПЛА аэрофотосъемки ключевых участков
Table 1. Basic parameters for UAV photography of key sites

Участок	Режим полета	Высота полета, м	Кол-во снимков, шт	Разрешение орто, см/пк	Разрешение ЦМР, см/пк	Кол-во контрольных точек, шт
Хадахан	2D	350	348	8.16	16.30	2
	3D	50	888	1.30	2.60	2
Мамонтов	2D	350	143	8.12	32.50	2
	2D	50	349	1.11	4.45	2
Бараний	2D	50	668	2.09	4.18	2
	2D	60	587	2.21	4.41	2
Улей	3D	60	836	2.12	4.24	2
	2D	60	731	2.20	4.39	3
Рассвет	3D	60	836	1.36	5.43	3



Рис. 4. Снимки ключевых участков. (а) – уч. Рассвет, высота полета 60 м; (б) – уч. Мамонтов, высота полета 350 м. Стрелки указывают на искусственные контрольные точки.

Fig. 4. Images of the key sites. (a) – Rassvet site, flight altitude 60 m; (b) – Mamontov site, flight altitude 350 m. The arrows indicate ground control points.

результатов выполняемых измерений количество контрольных искусственных реперов составило 2–3 на участках протяженностью до 2 км.

В качестве естественных точек, которые легко обнаружить на снимках, а их координаты измерить, использовались углы постоянных деревянных строений на берегу и бетонных заграждений.

3. Планирование полета.

Полетное задание загружалось в программу DJI GS RTK и включало план (область съемки и маршрут полета) и основные параметры полета (рис. 5).

4. Съемки с БПЛА.

Съемка осуществлялась в автоматизированном режиме. Оптимизация положения камеры производилась автоматически в ПО Agisoft Metashape и заключалась

в учете дополнительной привязки снимков с мобильной станции RTK.

5. Создание ортофотоплана и цифровой модели местности (ЦММ).

Собранный материал выгружался в ПО Agisoft Metashape для проведения фотограмметрических работ. Выравнивание снимков друг относительно друга проводилось с использованием Exif-данных фотографий. Далее производилась классификация плотного облака точек. Набор точек класса «поверхность» использовался для построения ЦМР с шагом сетки 0.05 м, прочие точки (растительность, строения) исключались из выборки [Agisoft Metashape..., 2022]. Для создания ортофотоплана и ЦМР использовались максимально возможные настройки ПО в режиме точности выравнивания

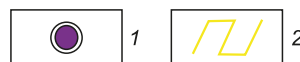


Рис. 5. Скриншот, отображающий полетное задание в программе DJI GS RTK. Маршрут полета смещен для выполнения съемки берегового уступа, угол обзора камеры БПЛА 60°: (а) – уч. Хадахан; (б) – уч. Рассвет. 1 – узлы сетки, ограничивающей площадь полета; 2 – траектория полета.

Fig. 5. Screenshot showing the flight task in DJI GS RTK software. The flight path is shifted to capture the coastal scarp, the UAV camera view angle is 60°: (а) – Khadakhan site; (б) – Rassvet site. 1 – nodes of the grid limiting the flight area; 2 – flight path.

снимков «очень высокая». Ортофотоплан строится относительно ЦММ. Также для выполнения расчетов была создана цифровая модель уклонов (ЦМУ).

6. Верификация моделей разных периодов.

Верификация моделей разных годов производилась по естественным и искусственным опорным точкам. В связи с тем, что модель 2021 г. была построена по данным съемки квадрокоптером DJI Inspire 1, для ее уточнения была использована модель 2022 г.

7. АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ

Заключается в выявлении динамики форм овражной эрозии, а именно в получении точных морфоме-

трических параметров форм процессов и рельефа, их динамики (плановое, объемное приращение, продольные и поперечные профили береговых склонов и оврагов).

В программе Agisoft Metashape отрисовывались и уточнялись контуры (положение, плановые очертания) характерных форм рельефа на основе ЦМР, ЦМУ и ортофотоплана. Этот этап работы является самым трудоемким и требует наличия соответствующих компетенций и навыков. Далее рассчитывались морфометрические параметры форм проявления процессов. На основе сравнительного анализа данных разных периодов оценивалась площадная и объемная динамика.

Динамика. Повторные съемки карстово-эрозионных форм на участке Хадахан выявили положительную динамику за период 2021–2022 гг. В ложбине стока нижнего оврага отмечается появление новых суффозионно-просадочных воронок выше вершины оврага и увеличение параметров (диаметр, глубина) наблюдаемых ранее форм. Объемный прирост суффозионно-просадочных воронок составил 0.45 м^3 за год. Также зафиксирован прирост в вершине верхнего и нижнего

оврага как в площадном ($19.8\text{--}12.2 \text{ м}^2$), так и в объемном ($35.4\text{--}27.1 \text{ м}^3$) отношении (рис. 6, табл. 2).

Для вторичных донных оврагов также была отмечена положительная динамика (табл. 2). Так, например, площадной прирост вершинной части донного оврага Бараний составил 11.6 м^2 за год (рис. 7).

На участке Рассвет зафиксирован аномально высокий темп абразии: площадь берегового склона, подвергшегося размыву за период 2021–2022 гг., составила

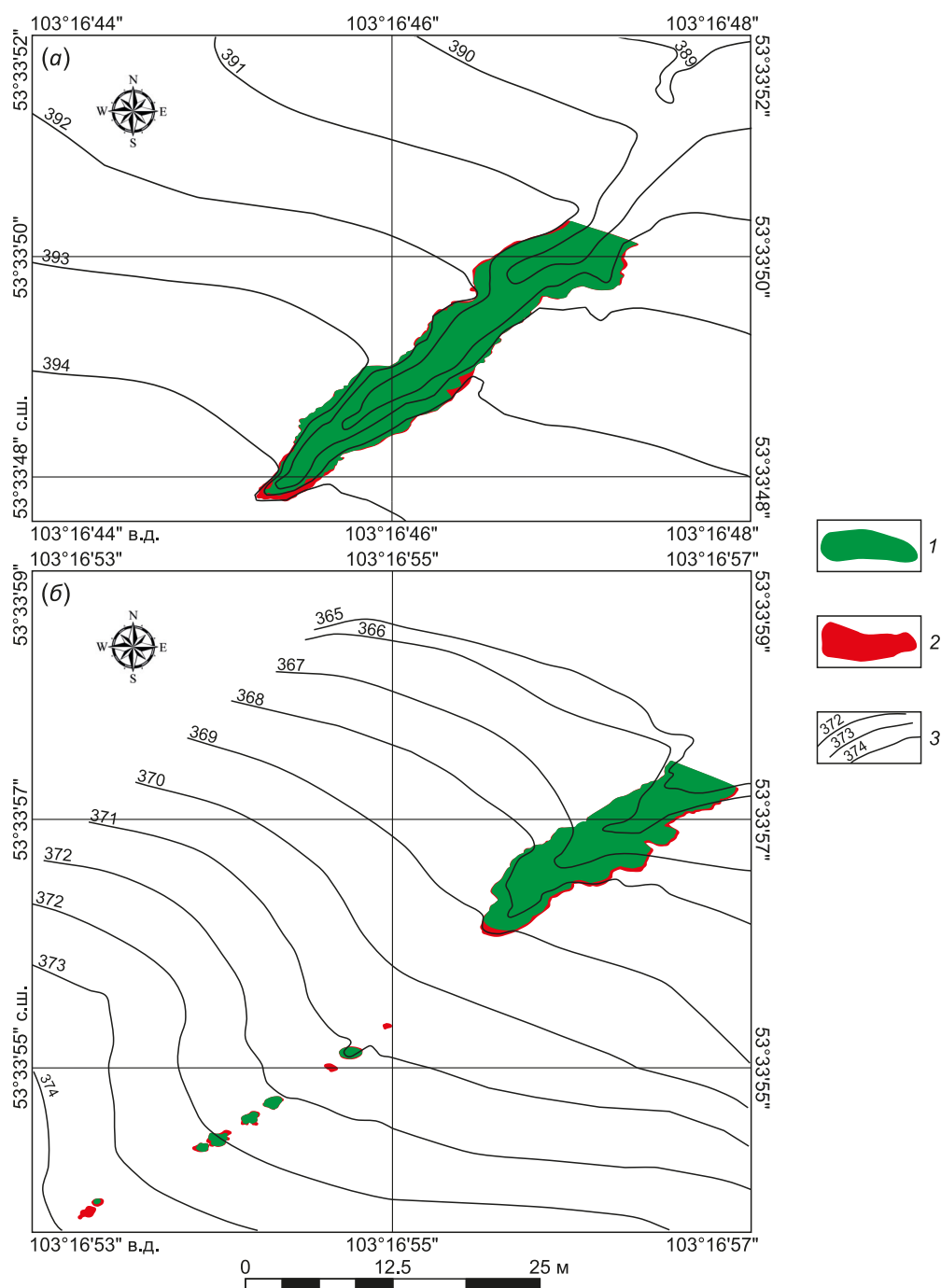


Рис. 6. Площадная динамика карстово-эрозионных форм на участке Хадахан. (а) – верхний овраг; (б) – нижний овраг. 1 – площадь оврага в 2021 г.; 2 – прирост площади за период 2021–2022 гг.; 3 – изогипсы.

Fig. 6. Areal dynamics of karst-erosion forms in the Khadakh site. (a) – upper gully; (б) – lower gully. 1 – gully area in 2021; 2 – area increase for the period 2021–2022; 3 – isohypses.

Таблица 2. Динамика форм экзогенных геологических процессов (ЭГП) по данным БПЛА аэрофотосъемки в 2021, 2022 гг.
Table 2. Dynamics of exogenous geological processes (EGP) from the data of UAV survey 2021–2022

Участок	Год съемки	Площадь, м ²	Изменение площади, м ²	Объем, м ³	Изменение объема, м ³	Форма ЭГП
Хадахан (верхний)	2021	306.8	19.9	400.6	35.4	карстово-эрозионный овраг
	2022	326.7		436.0		
Хадахан (нижний)	2021	158.9	12.2	102.9	27.1	карстово-эрозионный овраг
	2022	171.1		130.0		
Бараний	2021	676.0	11.6	1300.2	1.3	донный овраг
	2022	687.6		1301.5		
Рассвет	2021	3310.4	-1631.4	2507.5	-1154.4	береговые овраги
	2022	1679.0		1353.1		
Улей	2021	177.6	45.0	486.4	58.9	карстовая воронка
	2022	222.6		545.3		

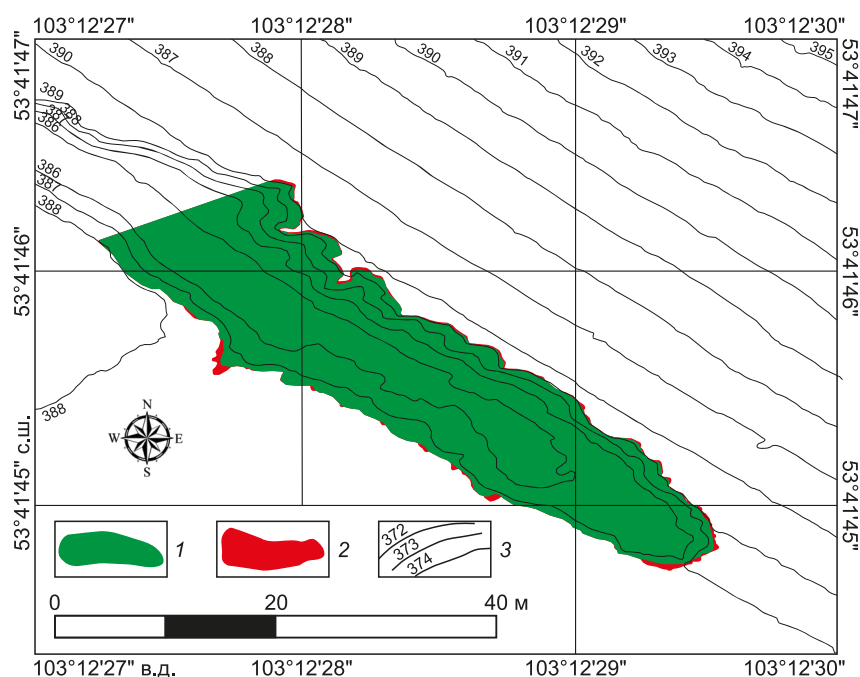


Рис. 7. Площадная динамика донного оврага на участке Бараний. 1 – площадь оврага в 2021 г.; 2 – прирост площади за период 2021–2022 гг.; 3 – изогипсы.

Fig. 7. Area dynamics of the valley-bottom gully at the Baranyi site. 1 – gully area in 2021; 2 – area increase for the period 2021–2022; 3 – isohypses.

6900 м², что соответствует 3.45 м размыва на погонный метр длины берега в среднем. Максимальная величина ширины размыва за этот период 6.51 м. При этом важно отметить, что среднесрочные значения абразионного размыва, рассчитанные за период 1980–2022 гг., варьируются в пределах 1.18–1.63 м/год.

Оценка суммарной объемной и площадной динамики береговых оврагов участка за 2021–2022 гг. показа-

ла отрицательные значения (–1154.4 м³ и –1631.4 м³ соответственно), так как устьевые части большинства оврагов были размывы абразией. В сравнении со среднесрочной объемной динамикой оврагов [Mazaeva et al., 2019], их количество уменьшилось с 47 в 2009 г. до 41 в 2021–2022 гг., а суммарный объем оврагов участка Рассвет незначительно вырос – с 2406.4 м³ в 2009 г. до 2507.5 м³ в 2021 г. (рис. 8). Причиной такой динамики

экзогенных процессов в береговой геосистеме стал максимально высокий уровень воды в водохранилище, близкий к НПГ (рис. 9).

На участке Улей динамика отступления бровки абразионного берега невелика, что обусловлено геологическим строением участка. Основные изменения наблюдаются в пределах берегового уступа и пляжа (рис. 10). Высокие уровни воды в водохранилище вызвали формирование волноприбойных ниш в абразионном уступе и обрушение берега над ними. Наблюдаемая положительная динамика выражается в росте вторичных донных врезов в днищах неактивных заросших береговых оврагов. Концептуальная модель, отражающая механизм возобновления донной эрозии, описана ранее в работе [Mazaeva et al., 2020]. Линейный прирост отдельных донных оврагов составил 0.17–1.31 м, прирост площади – 0.15–5.68 м², объема – 3.96–5.25 м³.

Как показывают исследования скоростей отступления вершин оврагов в различных природных условиях (климат, геоморфология, литология, сейсмичность, условия землепользования) во всем мире, разброс значений достаточно велик как в краткосрочной, так и в

долгосрочной динамике: площадные скорости прироста варьируются от 0.01 до 3628 м²/год, объемные отличаются на семь порядков [Wu, Cheng, 2005; Hu et al., 2007; Marzolf et al., 2011; Ryzhov, 2015; Vanmaercke et al., 2016; Gafurov et al., 2018].

Результаты исследования с помощью БПЛА аэрофотосъемки были сопоставлены с данными предыдущих исследований на тех же участках, полученными другими инструментальными методами. Ценность БПЛА аэрофотосъемки состоит в более детальной пространственной информации, в сравнении с традиционными аэрофотоснимками или полевыми методами (тахеометрическая съемка, линейные измерения, GPS RTK-съемка).

По темпам абразии годовые величины размыва превышают среднесрочные значения, что вполне объяснимо максимальными отметками уровня воды в водохранилище в период 2021–2022 гг.

Максимальная динамика площади и объема отмечается для береговых оврагов в активной стадии развития. Донные овраги показали меньшую, но стабильную положительную динамику, что сопоставимо по



Рис. 8. Динамика оврагов на участке Рассвет: изменение суммарного объема и количества форм.

Fig. 8. Dynamics of gullies in the Rassvet site: change in the total volume and number of forms.

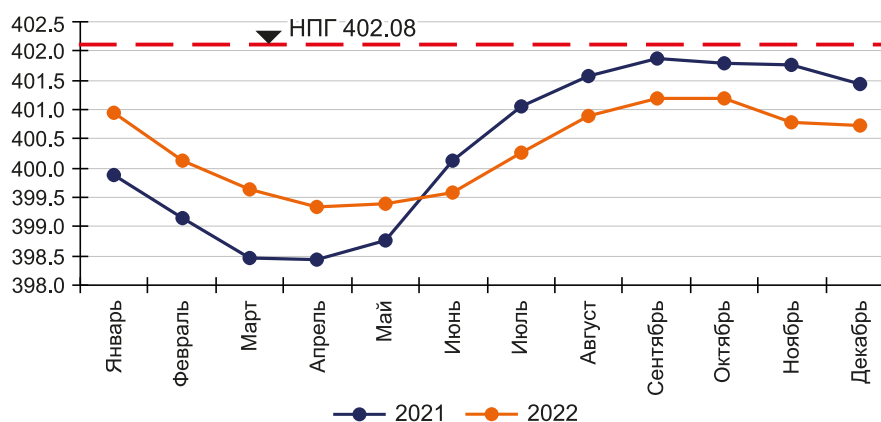


Рис. 9. Изменение уровня воды в Братском водохранилище по гидропосту Балаганск за 2021, 2022 гг. (по данным <http://hgraph.ru/bratges>).

Fig. 9. Water level changes in the Bratsk reservoir at the Balagansk gauging station for 2021, 2022 (taken from <http://hgraph.ru/bratges>).

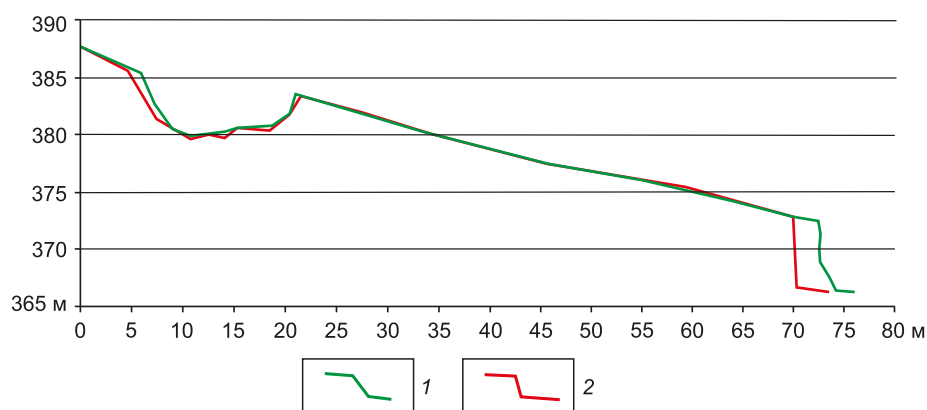


Рис. 10. Динамика профиля берегового уступа на участке Улей. 1 – 2021 г.; 2 – 2022 г.

Fig. 10. Beach scarp dynamics at the Uley site. 1 – 2021; 2 – 2022.

площадной динамике с ростом донных оврагов в других регионах [Grigorev, Rysin, 2021].

Таким образом, данные краткосрочной динамики процессов могут сильно отличаться от среднесрочных данных, однако они необходимы для фиксации и объяснения влияния контролирующих факторов процессов (экстремальные климатические события, внезапные изменения режима работы водохранилища с целью обеспечения выработки электроэнергии или защиты от наводнений). В данном случае причиной экстремальных краткосрочных значений динамики в 2021–2022 гг. опосредованно стала хозяйственная деятельность человека (высокий уровень воды, близкий к НПП).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ключевых участках береговой зоны юга Братского водохранилища создана сеть опорных реперов для мониторинговых исследований с использованием БПЛА.

В результате выполненных полевых и камеральных работ отработана методическая схема проведения мониторинга комплекса экзогенных геологических процессов в береговой зоне Братского водохранилища с применением БПЛА с целью получения рядов данных по динамике основных процессов.

Для каждого ключевого участка были определены оптимальные параметры съемки, которые позволили получить цифровую 3D модель высокого разрешения с минимальными трудозатратами.

Установлено, что высота полета 50–60 м является оптимальной для получения ортофотопланов с разрешением 1.1–2.2 см/пк, достаточным для оценки площадной динамики процессов, и ЦМР с разрешением 2.6–5.4 см/пк – для оценки объемной динамики.

Для съемки вторичных донных оврагов протяженных долинно-балочных систем (2–3 км) отлично зарекомендовал себя режим полета «Block Segmentation».

Ценность применения метода съемки с БПЛА состоит в получении данных по площадям и объемам форм экзогенных процессов. Как показали исследования, это

особенно актуально для вторичных донных оврагов, динамика которых проявляется в перераспределении объемов грунта внутри формы.

Преимущество съемки с использованием БПЛА заключается в экспрессности и комплексности получения данных для системного анализа динамики всей совокупности процессов, что обеспечивает высокую эффективность научно-исследовательских мониторинговых исследований.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

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

7. 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.

8. 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.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Agisoft Metashape Professional Edition, 2022. Version 1.8.5. User's manual. 118 p. Available from: <https://www.agisoft.com> (Last Accessed March 10, 2021).

Alexeev S.V., Gladkov A.S., Pellinen V.A., Alexeeva L.P., Svetlakov A.A., 2022. GPR Surveys and RPA Aerial Photography Using in Conducting Geocryological Studies on the Oka Plateau in the Eastern Sayan Ridge. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0621 (in Russian) [Алексеев С.В., Гладков А.С., Пеллинен В.А., Алексеева Л.П., Светлаков А.А. Георадиолокация и ДПЛА аэрофотосъемка при геокриологических исследованиях на Окинском плоскогорье в

Восточных Саянах // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0621]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0621>.

Bychkov I.V., Gladkochub D.P., Ruzhnikov G.M. (Eds), 2022. Fundamental Bases, Methods and Technologies of Digital Monitoring and Forecasting of Ecological Situation of Baikal Natural Territory. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 345 p. (in Russian) [Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории / Ред. И.В. Бычков, Д.П. Гладкочуб, Г.М. Ружников. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. 345 с.]. <https://doi.org/10.53954/9785604788943>.

Elsner P., Dornbusch U., Thomas I., Amos D., Bovington J., Horn D., 2018. Coincident Beach Surveys Using UAS, Vehicle Mounted and Airborne Laser Scanner: Point Cloud Inter-Comparison and Effects of Surface Type Heterogeneity on Elevation Accuracies. *Remote Sensing of Environment* 208, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.008>.

Filice F., Pezzo A., Lollino P., Perrotti M., Ietto F., 2022. Multi-Approach for the Assessment of Rock Slope Stability Using In-Field and UAV Investigations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 81, 502. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-03007-0>.

Gafurov A.M., 2017. Possibilities of Using an Unmanned Aerial Vehicle to Assess Soil and Gully Erosion. *Scientific Notes of Kazan University. Series Natural Sciences* 159 (14), 654–667 (in Russian) [Гафуров А.М. Возможности использования беспилотного летательного аппарата для оценки почвенной и овражной эрозии // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2017. Т. 159. № 4. С. 654–667].

Gafurov A.M., Rysin I.I., Golosov V.N., Grigoryev I.I., Sharifullin A.G., 2018. Estimation of the Recent Rate of Gully Head Retreat on the Southern Megaslope of the East European Plain Using a Set of Instrumental Methods. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography* 5, 61–71 (in Russian) [Гафуров А.М., Рысин И.И., Голосов В.Н., Григорьев И.И., Шарифуллин А.Г. Оценка современного роста вершин оврагов южного мегасклона Восточно-Европейской равнины с применением набора инструментальных методов // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. № 5. С. 61–71].

Gafurov A.M., Yermolayev O.P., Usmanov B.M., Khomyakov P.V., 2021. Creation of High-Precision Digital Elevation Models Using the GNSS UAV. *GI Support of Sustainable Development of Territories. Proceedings of the International Conference. Vol. 27. Iss. 2. MSU Faculty of Geography, Moscow*, p. 327–339 (in Russian) [Гафуров А.М., Ермолаев О.П., Усманов Б.М., Хомяков П.В. Создание высокоточных моделей высот с использованием ГНСС-БПЛА // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы международной конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. № 2. С. 327–339]. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339>.

Giordan D., Adams M.S., Aicardi I., Alicandro M., Allasia P., Baldo M., De Berardinis P., Dominici D. et al., 2020. The Use

of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Engineering Geology Applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 79, 3437–3481. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01766-2>.

Grigorev I.I., Rysin I.I., 2021. Estimation of Linear and Areal Growth of Gullies Using Instrumental Methods (on the Territory of Udmurtia). *Geomorphology* 52 (3), 64–78 (in Russian) [Григорьев И.И., Рысин И.И. Оценка линейного и площадного прироста оврагов с применением инструментальных методов (на территории Удмуртии) // Геоморфология. 2021. Т. 52. № 3. С. 64–78]. <https://doi.org/10.31857/S0435428121030044>.

Hu G., Wu Y., Liu B., Yu Zh., You Zh., Zhang Y., 2007. Short-Term Gully Retreat Rates over Rolling Hill Areas in Black Soil of Northeast China. *Catena* 71 (2), 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.02.004>.

Kolesatova O.S., Krasavin A.V., 2020. Use of UAVs for Surveying Open-Pit Mining Sites. *Globus* 4 (63) (in Russian) [Колесатова О.С., Красавин А.В. Использование БПЛА для съемки объектов открытых горных работ // Глобус. 2020. Т. 63. № 4]. Available from: <https://www.vnedra.ru/globus/> (Last Accessed March 10, 2021).

Krasilova N.S., 1997. Geological Natural Processes, Their Impact on Lithosphere and Ecological Consequences. In: V.T. Trofimov (Ed.), *Theory and Methodology of Ecological Geology*. MSU Publishing House, Moscow, p. 141–200 (in Russian) [Красилова Н.С. Геологические природные процессы, их воздействие на литосферу и экологические последствия // Теория и методология экологической геологии / Ред. В.Т. Трофимов. М.: Изд-во МГУ, 1997. С. 141–200].

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].

Lunina O.V., Denisenko I.A., Gladkov A.A., Braga C., 2023. Enigmatic Surface Ruptures at Cape Rytyi and Surroundings, Baikal Rift, Siberia: Seismic Hazard Implication. *Quaternary* 6 (1), 22. <https://doi.org/10.3390/quat6010022>.

Lunina O.V., Gladkov A.A., 2022. The Rupturing Phenomena in the Deltaic Deposits of Cape Rytyi on the Northwestern Shore of Lake Baikal. *Russian Geology and Geophysics* 63 (2), 125–136. <https://doi.org/10.2113/RGG20204270>.

Makarov S.A. (Ed.), 2018. Application of Drones in Geographical Research. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference (Irkutsk, May 22–23, 2018)*. Publishing House of the Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, 135 p. (in Russian) [Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях: Материалы всероссийской научно-практической конференции (Иркутск, 22–23 мая 2018 г.) / Ред. С.А. Макаров. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сошавы СО РАН, 2018. 135 с.].

Marzolff I., Ries J.B., Poesen J., 2011. Short-Term versus Medium-Term Monitoring for Detecting Gully-Erosion Variability in a Mediterranean Environment. *Earth Surface Processes and Landforms* 36 (12), 1604–1623. <https://doi.org/10.1002/esp.2172>.

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, 4659–4672. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1428-x>.

Mazaeva O., Babicheva V., Kozyreva E., 2020. Gully Development on Large Dam Reservoir Shores: Dynamics, Interaction, and Mechanisms. *Physical Geography* 41 (30), 195–216. <https://doi.org/10.1080/02723646.2019.1613329>.

Ovchinnikov G.I., Pavlov S.Kh., Trztsinskiy 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., Трзцинский Ю.Б. Изменение геологической среды в зонах влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ. Новосибирск: Наука, 1999. 254 с.].

Rybchenko A.A., Kadetova A.V., Kozyreva E.A., Yuriev A.A., 2019. Experience of Using Non-Specialized Unmanned Aerial Vehicles for Aerial Surveys in the Studies of Exogenous Geological Processes. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (4), 1045–1058 (in Russian) [Рыбченко А.А., Кадетова А.В.,

Козырева Е.А., Юрьев А.А. Решение тематических задач при изучении экзогенных геологических процессов с применением неспециализированных беспилотных комплексов для аэрофотосъемки // *Геодинамика и тектонофизика*. 2019. Т. 10. № 4. С. 1045–1058]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-4-0457>.

Ryzhov Yu.V., 2015. Formation of Gullies in the South of Eastern Siberia. GEO, Novosibirsk, 180 p. (in Russian) [Рыжов Ю.В. Формирование оврагов на юге Восточной Сибири. Новосибирск: Гео, 2015. 180 с.].

Vanmaercke M., Panagos P., Vanwalleghem T., Hayas A., Foerster S., Borrelli P., Rossi M., Torri D. et al., 2021. Measuring, Modelling and Managing Gully Erosion at Large Scales: A State of the Art. *Earth-Science Reviews* 218, 103637. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103637>.

Vanmaercke M., Poesen J., Van Mele B., Demuzere M., Bruynseels A., Golosov V., Rodrigues Bezerra J.F., Bolysov S. et al., 2016. How Fast Do Gully Headcuts Retreat? *Earth-Science Reviews* 154, 336–355. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.009>.

Wu Y., Cheng H., 2005. Monitoring of Gully Erosion on the Loess Plateau of China Using a Global Positioning System. *Catena* 63 (2–3), 154–166. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.002>.

Zorina E.F. (Ed.), 2006. Geography of Gully Erosion. MSU Publishing House, Moscow, 324 p. (in Russian) [География овражной эрозии / Ред. Е.Ф. Зорина. М.: Изд-во МГУ, 2006. 324 с.].