

Опасные экзогеодинамические процессы Қауіпті экзогеодинамикалық процестер Dangerous exogeodynamic processes

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-2-86-96.23>

МРНТИ 39.01.00; 39.01.94; 39.19.00
УДК 551.4.042; 551.4.02

Е. Е. Халыков¹, М. М. Тоғыс², Ю. Ф. Лый^{*3},
К. С. Оразбекова⁴, Ұ. Р. Алдаберген⁵

¹ PhD, старший научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; e.halykov@mail.ru)

² Научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; maulenmm@mail.ru)

^{3*} К. г. н., старший научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; uisya_lyi77@mail.ru)

⁴ PhD, старший научный сотрудник (АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; kuralay_orazbekova@mail.ru)

⁵ Младший научный сотрудник, PhD докторант (АО «Институт географии и водной безопасности», Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан; aldabergen_u@mail.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПОЛЗНЯ В ДОЛИНЕ РЕКИ КАСКЕЛЕН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Аннотация. Исследован оползень скольжения в долине реки Каскелен (Иле Алатау, Казахстан), угрожающий инфраструктуре и дачному массиву, с использованием данных, полученных с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). На основе высокоточных цифровых моделей рельефа изучены морфометрические характеристики медленно движущегося оползня, выявлены зоны деформации и рассчитаны параметры устойчивости склонов. Установлено, что оползень развивается в лёссовидных суглинках, теряющих прочность при переувлажнении, с максимальной скоростью смещения до 59 см/год. Расчет коэффициента устойчивости показал критическое состояние участков с уклоном $>15^\circ$. Предложено вести мониторинг с использованием глобальной навигационной спутниковой системы и выполнить такие инженерные решения, как дренажные системы и укрепление георешетками. Результаты подчеркивают необходимость интеграции БПЛА-технологий с другими полевыми методами для прогнозирования оползневых рисков в горных регионах.

Ключевые слова: оползни, река Каскелен, мониторинг, БПЛА, цифровая модель рельефа.

Введение. Горные районы Казахстана, такие, как Иле и Жетысу Алатау, характеризуются сложными геологическими, геоморфологическими и климатическими условиями, что делает их уязвимыми к активному развитию оползневых процессов. В Иле Алатау многочисленные реки играют важную роль в формировании местной рельефной среды, ландшафтов и обеспечении водными ресурсами. К ним относятся Улкен Алматы, Киши Алматы, Каскелен, Талгар и другие. Оползневые процессы широко распространены в долинах рек хребта Иле Алатау вследствие сочетания естественных факторов, таких, как крутые склоны, неустойчивый литологический состав грунта, склонного к оползанию, интенсивная эрозия, сезонные осадки и сейсмическая активность, а также антропогенное воздействие. Это делает их одной из ключевых геодинамических угроз в регионе.

Оползень – гравитационный склоновый процесс, представляющий собой смещение масс горных пород или грунтов вниз по склону (естественному или искусственному) под действием силы тяжести, часто сопровождающееся скольжением по выраженной поверхности или зоне смещения. Оползневые явления относятся к денудационно-аккумулятивным экзогенным процессам, при которых смещение происходит без существенного участия внешних транспортирующих агентов. Этот процесс может быть вызван различными факторами, включая вес пород, давление воды, сейсмические воздействия или техногенные нагрузки. Оползень сохраняет связь с неподвижным основанием и формирует оползневое тело, ограниченное снизу поверхностью скольжения, а сверху земной поверхностью [1-5].

В последние десятилетия в предгорных частях долин рек региона наблюдается рост активизации оползневых процессов, обусловленный как природными факторами, так и антропогенным воздействием. Это явление не только угрожает жизни людей, приводя к трагическим жертвам, но и наносит значительный экономический ущерб, разрушая инфраструктуру, жилые дома и дачные участки.

В этой работе приведены результаты исследования оползня в долине реки Каскелен с использованием современных методов, включая космические снимки и беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Применение БПЛА позволило получить ортофотопланы и цифровые модели рельефа (ЦМР) оползневого участка, что обеспечило возможность анализа морфометрических характеристик. Использование этих методов позволило не только оценить текущее состояние оползня, но и выявить ключевые факторы, влияющие на его активизацию, что является важным шагом для разработки мер по снижению рисков и прогнозированию дальнейшего развития оползневых процессов.

Материалы и методы исследования. В последние годы БПЛА стали одним из ключевых методов изучения оползневых процессов, благодаря их способности получать данные высокого разрешения о рельефе и динамике склоновых процессов. БПЛА позволяют оперативно создавать ортофотопланы и ЦМР с разрешением до нескольких сантиметров, что значительно повышает точность мониторинга оползневых участков [6]. Например, исследования в Альпах продемонстрировали, что использование БПЛА для многократной съемки позволяет отслеживать смещение оползневых масс и выявлять зоны повышенной активности оползня [7]. Эти данные особенно важны для прогнозирования дальнейшего развития оползней и оценки рисков для инфраструктуры.

Одним из ключевых преимуществ БПЛА является их способность работать в труднодоступных горных районах, где применение традиционных методов наземных измерений затруднено. В исследовании, проведенном в долине реки Каскелен, применение БПЛА позволило выявить микрорельефные формы, трещины, уступы, оползневое тело и зоны деформации, которые являются индикаторами динамики оползневых процессов. Полученные данные были интегрированы с результатами наземного лазерного сканирования, что обеспечило комплексный анализ морфологии склонов и динамики оползня.

Кроме того, данные БПЛА успешно используются для создания трехмерных моделей оползневых тел, что дает возможность оценивать объемы смещенных масс и прогнозировать потенциальные сценарии развития оползней. Например, в исследовании, проведенном в Австрии, сочетание данных БПЛА и других методов дистанционного зондирования Земли позволило определить границы развития оползневого процесса, установить наличие трещин, направление и скорость потока. Эти результаты подчеркивают важность интеграции данных БПЛА с другими геотехнологиями для повышения точности и надежности мониторинга оползней [8, 9].

Таким образом, применение БПЛА в изучении оползневых процессов открывает новые возможности для мониторинга и анализа опасных геодинамических явлений. Высокая детализация данных, оперативность и возможность работы в сложных условиях делают БПЛА незаменимым инструментом для исследований оползней в горных регионах и разработки мер по снижению рисков.

Оползневые процессы в долине реки Каскелен изучались с помощью инструментов БПЛА DJI Matrice 300 RTK (Китай) и наземного лазерного сканера (НЛС) Riegl VZ-4000 (Австрия). Основные характеристики БПЛА DJI Matrice 300 RTK: промышленный квадрокоптер, съемная камера ZENMUSE P1; размер сенсора (фото): 35,9×24 мм (полный кадр); размер сенсора (макс. область записи видео): 34×19 мм; эффективные пиксели: 45 МП; размер пикселя: 4,4 мкм, размер фото

3:2 (8192×5460); система позиционирования (GPS, BeiDou, Galileo, GLONASS) [10]. Основные характеристики НЛС VZ-4000: дальность съемки – до 4000 м; поле зрения – 60×360°; производительность – до 147 000 точек/с; высокая точность и повторяемость измерения расстояний за счет оцифровки и обработки сигнала в режиме реального времени; оцифровка и обработка сигнала для получения нескольких отражений от множества целей; переносная, портативная и надежная конструкция [11].

На основе аэрофотоснимков, полученных с применением БПЛА, посредством фотограмметрической обработки создаются ортофотопланы и цифровые модели рельефа, обеспечивающие высокоточное представление исследуемого оползня. На первом этапе осуществляется планирование полета с перекрытием снимков не менее 70–80% для обеспечения достаточной стереоскопичности. Качественная обработка требует калибровки камеры и учета атмосферных условий съемки. После полета снимки проходят этап привязки с использованием координат контрольных точек (марок) и данных глобальной навигационной спутниковой системы. Далее выполняется построение облака точек методом сопоставления изображений, из которого генерируются ортофотоплан и далее ЦМР. При этом ортофотоплан формируется путем коррекции снимков на геометрические и рельефные искажения, а ЦМР – через фильтрацию облака точек для выделения поверхности земли. В результате получены детальные данные о рельефе и смещении оползня. Примененные методы позволили оценить текущее состояние оползня, выявить ключевые факторы его активизации и разработать меры по снижению рисков.

Район исследований. Он расположен в центральной части северного склона хребта Иле Алатау, характеризующегося распространением денудационно-тектонического рельефа. К этой категории относятся все горно-складчатые сооружения юга Казахстана, образовавшиеся вследствие активного проявления новейших тектонических движений. Здесь выделяются следующие типы рельефа: высокогорный, среднегорный и низкогорный.

Оползневые процессы наиболее выражены в среднегорьях Иле-Алатауского хребта, преимущественно на высотах от 1000 до 2000 м. В отличие от высокогорья рельеф среднегорья отличается меньшей степенью расчлененности, более пологими склонами и отсутствием ледниковых форм. Амплитуда относительных высот между вершинами и днищами долин обычно не превышает 500–700 м. Долины рек сохраняют V-образную форму с немного расширенными днищами, которые состоят из рыхлого обломочного материала.

Река Каскелен относится к крупным притокам р. Иле и принадлежит бассейну озера Балкаш. Водный режим реки Каскелен тесно связан с высотой и экспозицией склонов, при этом основную роль в ее питании играют талые воды ледников и атмосферные осадки. Река характеризуется сложным гидрологическим режимом, обусловленным сезонными колебаниями стока, интенсивным таянием ледников и осадками, что создает предпосылки для развития опасных геодинамических процессов, включая оползни.

Долина реки Каскелен, с ее крутыми склонами и активной эрозионной деятельностью, представляет собой зону повышенного риска, где оползневые процессы могут приводить к значительным негативным экономическим последствиям, что делает актуальным проведение детальных исследований в этом районе. В долине реки Каскелен оползни являются серьезной угрозой для жизнедеятельности населенных пунктов, транспортной и коммунальной инфраструктуры. Некоторые оползни представляют высокую степень опасности и могут стать реальной угрозой для жизни и здоровья людей, находящихся поблизости.

Формирование оползневых процессов – сложный полигенетический процесс, обусловленный взаимодействием глобальных, региональных и локальных факторов, включая неотектонические движения, сейсмическую активность, климатические условия и антропогенные воздействия. При этом значительную роль в их активизации играет эволюция горных речных долин. Динамичность оползневых процессов характерна для горных долин, где их активизация обусловлена сочетанием климатических (ливневые осадки), сейсмических (глубокие низкочастотные землетрясения) и антропогенных факторов. В горной части долины реки Каскелен было выявлено 18 оползнеопасных участков. Однако для исследования выбран оползень скольжения, расположенный в нижней части долины р. Каскелен, выше экологического поста, рядом с автомобильной дорогой Каскелен – карьер Известковый (рисунок 1). Это древний оползень с активной фронтальной частью. Большинство оползневых процессов в исследуемом районе приурочено к нижнечетвер-

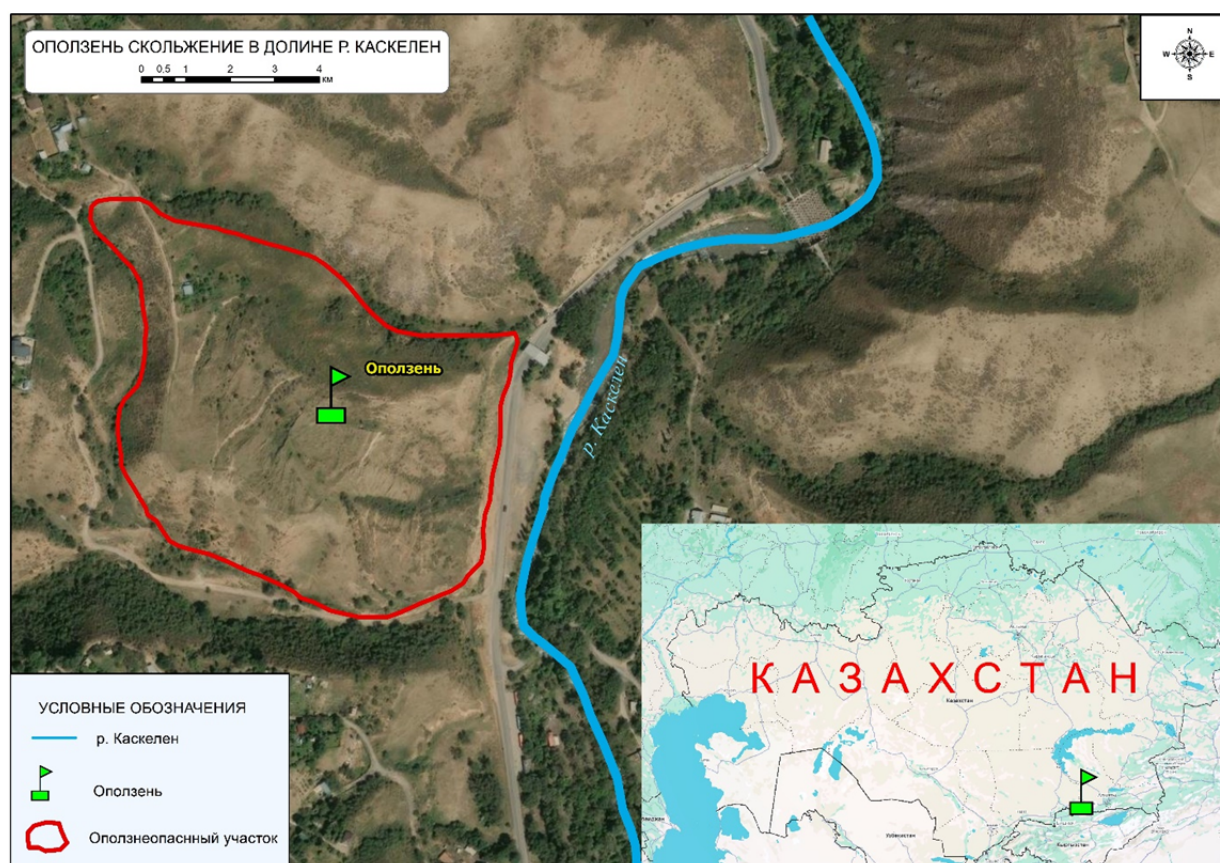


Рисунок 1 – Оползень скольжение в долине реки Каскелен

Figure 1 – Landslide sliding in the Kaskelen River valley

тичным лёссовидным суглинкам, теряющим несущую способность при переувлажнении, также встречаются оползни обрушения сейсмогравитационного происхождения. На участке, где развиты оползневые процессы, выполнены полевое обследование и аэрофотосъёмка с использованием БПЛА.

Результаты и их обсуждение. Исследуемый оползень расположен выше автомобильной дороги Каскелен–Известковый на левом берегу речной долины, в 0,5 км южнее селезащитной плотины (рисунок 2).

Основные характеристики оползня. Положение оползня по отношению к склону – фронтальный уступ вал древнего оползня, подрезанный выемкой для автодороги (рисунок 3), долина левого притока Каскелена. Ориентация склона – восток-юго-восток. Форма оползания в плане извилистая. Высота вершины – 1163 м над ур. м., высота подножия – 1110 м над ур. м., относительное превышение – 53 м. Расположен в огромном оползневом цирке в окружении еще более крупных оползней. В теле оползней активно происходят вторичные оползневые процессы. Характер поверхности оползня ступенчатый, бугристый. Нарушения или смещения на поверхности земли и их характер – наблюдаются оползневые ступени и трещины (высота ступени – 0,2-1,5 м, ширина трещин – до 0,7 м). Происхождение поверхности скольжения – увлажненный слой. Высота стенок срыва – от 0,5 до 10 м. Имеет несколько поверхностей скольжения. Крутизна поверхности скольжения у выхода ее на дневную поверхность – 21° . Относится к типу оползня скольжения. Основные размеры оползнеопасного участка: длина – 1500 м, ширина – 300 м, толщина – 50 м, общий объем – 1,4 млн м^3 , объем отдельных блоков оползней – до 100 м^3 . Основные размеры тела оползня: длина – 370 м, ширина – 250 м, стенка срыва – до 10 м. Продольный профиль выпуклый. Профиль склона изменен искусственно в результате подрезки склона дорогой. Типы оползающих пород – лёссовидные суглинки в верхней части и неогеновые глины в нижней. Характер и форма увлажнения пород участка – атмосферные осадки 1462 мм при норме 1424 мм (2024 год) [12],



Рисунок 2 – Оползень скольжения в долине р. Каскелен
Figure 2 – Sliding landslide in the Kaskelen River valley



Рисунок 3 – Цифровая модель рельефа – тело оползня в естественных цветах
(вид с передней части)

Figure 3 – Digital elevation model of landslide body in natural colors
(view from the front)

выходы грунтовых вод, бытовые жидкости из устройств негерметичных уборных и септиков. Возраст оползня современный. Мера опасности повреждения оползнем инженерных сооружений: ущерб коммуникациям и дачным строениям, заваливает автодорогу на участке длиной 200 м.

По словам сотрудников Казселезащиты, причиной возникновения оползня стал проложенный в начале 2000-х годов трубопровод для подачи воды из русла реки Каскелен. Бесконтрольное и нерациональное использование воды, устройство негерметичных уборных и септиков привели к активизации оползневых явлений в мае 2004 года. Медленное движение оползня фиксировалось дважды при наблюдении за прорывом водопроводной трубы, используемой для дач. Первый раз в 2006 году железная труба разошлась по стыку на 20 см, а во второй раз в 2007 году – на 22 см. Полевые исследования на этом участке проводились с октября 2012 года сотрудниками Института географии. С 2012 по 2014 год в нижней части оползня наблюдалось смещение грунта до 59 см. В 2013 году вся площадь оползня была отсканирована с помощью 3D лазерного сканера RIEGL VZ-4000 и повторно отсканирована в 2014 и 2018 годах. С использованием БПЛА и НЛС ведется мониторинг оползня [13-15]. В рамках исследования планируется организовать сбор данных с применением беспилотной аэрофотосъемки и НЛС для последующего формирования облаков точек. На следующем этапе будет проведена их геодезическая привязка к единой системе координат с использованием сети наземных опорных марок. Затем данные будут подвергнуты предварительной обработке для устранения погрешностей и последующей сшивке с учетом пространственного разрешения и параметров точности используемых технологий. На завершающем этапе предполагается провести комплексный анализ интегрированного облака точек для создания высокоточных цифровых моделей рельефа и объектов, а также для оценки эффективности совместного применения методов.

В ходе обследования 21 сентября 2024 года с применением БПЛА получены аэрофотосъемки оползня. В дальнейшем при обработке данных построены цифровая модель рельефа тела оползня в естественных цветах (рисунок 3), а также цифровая модель местности тела оползня с высотным распределением рельефа (рисунок 4).

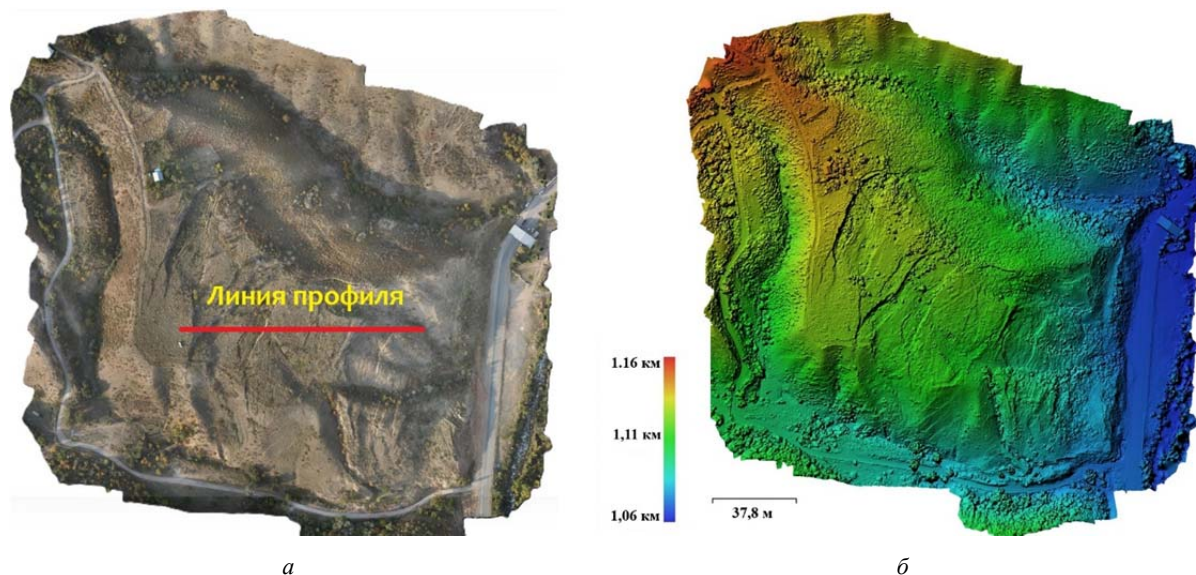


Рисунок 4 – Цифровая модель рельефа тела оползня в естественных цветах с линией продольного профиля (вид сверху) – а; цифровая модель местности тела оползня (вид сверху) – б
Figure 4 – Digital elevation model of landslide body in natural colors with longitudinal profile line (top view) – а;
digital terrain model of the landslide body (top view) – б

ЦМР и ЦММ демонстрирует сложную морфометрическую структуру оползня, сформированного в результате комбинации гравитационных сил, климатических факторов и литологических особенностей местности. Естественная цветовая дифференциация может указывать на различные типы грунтов или степень насыщенности влагой. По результатам ЦМР оползня получили характеристики форм микрорельефа, а также определили зону отрыва (верхняя часть), транзитную

зону (средняя часть) и фронтальную зону (нижняя часть). Морфометрические характеристики микрорельефа оползня: длина – 370 м, ширина – 250 м, стенки срыва – до 10 м, ширина трещин – от 0,2 до 1,5 м, глубина трещин – до 1,5 м, выявлены 6 крупных оползневых ступеней (длина бровки ступеней – от 63 до 136 м), высота стенки срыва – до 8 м, длина оползневых ступеней – от 35 до 70 м.

Механизм движения оползня на основе ЦМР – преобладает блоковое скольжение по криволинейной поверхности с элементами пластического течения. В зонах максимальной деформации поверхности в верхней части оползня наблюдаются вертикальные трещины растяжения (мелкие шириной 0,2-0,5 м и крупные до 1,5 м, глубина достигает 1,5 м), в центральной части отмечаются горизонтальные смещения с образованием ступенчатых террас, по фронту оползня заметно выдавливание переувлажненных масс грунта.

На основе ЦМР оползня был составлен продольный профиль (рисунок 5). Продольный профиль имеет выпуклую форму.

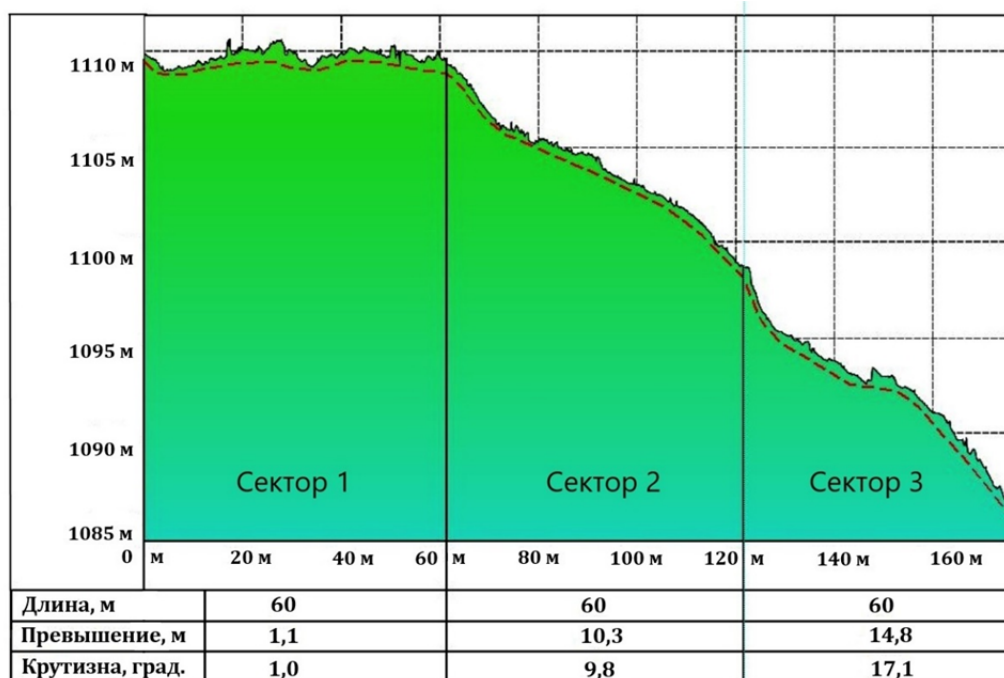


Рисунок 5 – Продольный профиль оползня

Figure 5 – The longitudinal profile of the landslide

Морфометрическая характеристика профиля: общая длина профиля – 168 м (по горизонтали); перепад высот – 1110 м – 1085 м = 25 м, минимальный уклон в пологой части – 1°, средний уклон – 8,5°, максимальный уклон – 17,1°. Сделан секторный анализ продольного профиля (см. таблицу).

Секторный анализ продольного профиля оползня

Sectoral analysis of the longitudinal profile of the landslide

Сектор	Длина, м	Перепад, м	Уклон, град.	Характеристика
1	60	1,1	1,0	Пологий верхний склон
2	60	10,3	9,8	Крутой транзитный участок
3	48	14,8	17,1	Обрыв фронтального уступа

На основе полученных данных рассчитана оценка устойчивости. Коэффициент безопасности (Factor of Safety, FoS) – это ключевой инженерно-геологический параметр, который определяет степень устойчивости склона путем сравнения сопротивления грунта с действующими на него нагрузками [16]. В методах предельного равновесия предполагается, что склон находится на грани

разрушения, а FoS устанавливается из равновесия сил или моментов. Основные алгоритмы включают простое деление сдвигающей прочности на действующее касательное напряжение ($FoS = \tau_{\text{resist}} / \tau_{\text{driving}}$). В контексте оползней оно показывает, насколько склон устойчив против смещения.

Расчет коэффициента безопасности исследуемого оползня (FoS) для сектора 2 (критический участок):

$$FoS = \tan\phi / \tan\alpha = \tan(15^\circ) / \tan(9,8^\circ) \approx 1,53 \text{ (стабильно при сухих условиях).}$$

При насыщении жидкостью ($\phi = 12^\circ$):

$$FoS = \tan(12^\circ) / \tan(9,8^\circ) \approx 1,21 \text{ (предельное равновесие).}$$

$\tan\phi$ – математическое выражение доли трения в устойчивости склона.

$\tan\phi$ – тангенс угла внутреннего трения грунта (ϕ),

где ϕ характеризует способность грунта сопротивляться сдвигу за счет трения между частицами; чем выше ϕ , тем устойчивее склон (например, для гравия $\phi \approx 35\text{--}40^\circ$, для лёссовидных суглинков – $12\text{--}15^\circ$).

$\tan\alpha$ – тангенс угла наклона склона (α),

где α – фактический угол наклона поверхности скольжения (в вашем случае $9,8^\circ$).

$\tan\alpha$ отражает долю силы тяжести, которая «тянет» грунт вниз по склону.

Лёссовидные суглинки резко теряют ϕ при увлажнении:

сухие: $\phi = 15^\circ \rightarrow FoS = 1,53$;

насыщенные: $\phi = 12^\circ \rightarrow FoS = 1,21$.

Крутизна склона (α): даже небольшое увеличение α (например, с $9,8$ до 12°) при $\phi=12^\circ$ даст $FoS = 1,0$ (начало движения).

Предельное равновесие – это состояние склона или грунтового массива, при котором сдвигающие силы (например, вес грунта, внешние нагрузки, гидрологическое давление) уравновешиваются удерживающими силами (сопротивлением грунта сдвигу). В этот момент склон находится на грани потери устойчивости, и даже незначительное воздействие (дождь, вибрация) может спровоцировать смещение. При $FoS=1,0$ склон начнет смещаться. Если FoS снижается до $1,0$, риск обрушения становится критическим. Подводя итоги, можно выделить опасные участки оползня: фронтальный уступ ($17,1^\circ$) – риск прогрессирующего обрушения. В границах секторов 1-2 возможно образование новых трещин.

Оползни в горных склонах и долинах горных рек – одна из самых разрушительных природных угроз, возникающая из-за сочетания естественных факторов (крутые склоны, эрозия, обильные осадки, сейсмичность территории) и антропогенного воздействия (вырубка лесов, строительство дорог, нерациональное землепользование). Последствия оползней в таких районах особенно тяжелы. Они не только уничтожают инфраструктуру, жилые дома и сельскохозяйственные угодья, но и приводят к человеческим жертвам. К примеру, 8 февраля 2024 г. в алматинском микрорайоне «Тау-Самал» сошёл оползень, который разрушил два дома и унёс жизни четырёх человек [17]. В Талгарском районе Алматинской области с 21 на 23 марта 2024 г. произошел самопроизвольный сход грунта со склона горы на территорию двух частных жилых домов в связи с неустойчивыми погодными условиями (осадки в виде дождя и снега) [18].

Для снижения рисков необходимы комплексные меры, включая мониторинг опасных участков, укрепление склонов и строгое регулирование хозяйственной деятельности в уязвимых зонах. Для минимизации рисков от оползня рекомендуются:

1) устройство дренажных систем для отвода поверхностных и грунтовых вод (лотки, штольни, горизонтальные скважины), что снизит насыщение лёссовидных суглинков и повысит коэффициент FoS до безопасных значений;

2) укрепление склонов (дренажные штольни, габионы, посадка деревьев);

3) укрепление фронтального уступа георешетками или габионами, чтобы предотвратить обрушение и выдавливание грунта;

4) мониторинг деформаций оползня с помощью высокоточных ГНСС и замеров трещин, особенно в зонах с $FoS < 1,3$;

- 5) снижение нагрузки на склон – регулирование деятельности строительства в верхней части оползня (зона отрыва) и минимизация вибраций от тяжелого транспорта;
- 6) посадка растений с глубокой корневой системой (ивы, облепиха) для биологической стабилизации склона, контроль вырубок деревьев;
- 7) регулярная аэрофотосъемка (раз в 6 месяцев) для выявления новых смещений оползня;
- 8) системы раннего оповещения для своевременной эвакуации.

Заключение. Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность применения БПЛА для изучения оползневых процессов. Их использование позволило получить детальные цифровые модели рельефа с высоким пространственным разрешением, что существенно повысило точность анализа морфометрии при изменении оползневых склонов. Результаты исследования выявили сложный характер деформаций, включая блоковые смещения, образование трещин растяжения и выдавливание переувлажненных масс во фронтальной части.

Полученные ЦМР оползня обеспечили высокодетализированное представление о его морфологии, позволив точно идентифицировать зоны отрыва, транзита и аккумуляции. Данные продольного профиля выявили критические участки склона с уклонами до $17,1^\circ$, находящиеся в состоянии предельного равновесия. Эти результаты имеют важное прикладное значение для прогнозирования развития оползневых процессов и оценки устойчивости склонов. Интеграция полевых морфометрических данных и ЦМР с анализом продольных профилей создает надежную основу для разработки эффективных мер защиты инфраструктуры в горных регионах.

Ключевым фактором активизации оползневых процессов на исследуемом участке является совокупное воздействие антропогенных и природных условий. К ним относятся просачивание в грунт бытовых сточных вод, выходы грунтовых вод, значительная крутизна склонов (до $17,1^\circ$), а также литологический состав лёссовидных суглинков, способствующий снижению устойчивости склонов. Расчеты коэффициента устойчивости (FoS) показали, что участки с уклоном более 15° находятся в состоянии предельного равновесия (FoS=1,21 при насыщении грунтов влагой), что создает высокий риск активизации оползневых процессов. Активизация оползневых процессов на изучаемом участке представляет серьезную угрозу для инфраструктуры. Среди возможных последствий – частичное или полное перекрытие автодороги, что может привести к нарушению транспортного сообщения, а также риск перекрытия русла реки. Это, в свою очередь, может вызвать локальное затопление прилегающих территорий и ускорить деградацию склонов, что потребует дополнительных мер по мониторингу и укреплению стабильности участка.

Полученные данные подчеркивают необходимость комплексного подхода к мониторингу оползневой опасности, сочетающему современные дистанционные методы с традиционными геотехническими исследованиями. Результаты работы вносят вклад в развитие методов прогнозирования оползневых процессов в горных регионах с аналогичными природно-климатическими условиями. Данные исследования могут быть использованы для оценки устойчивости склонов, мониторинга с применением БПЛА и цифрового моделирования рельефа. Кроме того, результаты работы могут быть полезны при планировании инженерных сооружений и инфраструктуры в сейсмоактивных регионах, а также для органов гражданской защиты при разработке мер по предупреждению и минимизации последствий оползней. Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение долгосрочной динамики оползней и оценку влияния климатических изменений на их активизацию.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме «Научно-прикладное обоснование селе-, оползне- и лавинобезопасности в горных районах Иле и Жетысу Алатау Республики Казахстан». Программно-целевое финансирование № BR21881982.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Петров Н. Ф. Оползневые системы. Простые оползни (аспекты классификации). – Кишинев: Штиинца, 1988. – 226 с.
- [2] Гулакян К. А., Кюнтцель В. В., Постоев Г. П. Прогнозирование оползневых процессов. – Москва: Недра, 1977. – 135 с.
- [3] Иванов И. П., Тржцинский Ю. Б. Инженерная геодинамика. – СПб.: Наука, 2001. – 416 с.
- [4] Трофимов В. Т., Калинин Э. В. и др. Инженерная геология России. Инженерная геодинамика территории России. – Т. 2. – Москва: Издательский дом КДУ. – 2013. – 816 с.

- [5] Cruden D. M., Varnes D. J. (1996). Landslide types and processes. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* // Transportation Research Board Special Report. – 247. – P. 36-75.
- [6] Eltner A., Kaiser A., Castillo C., Rock G., Neugirg F., Abellán A. Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments // *Earth Surface Dynamics*. – 2016. – Vol. 4, issue 2. – P. 359-389. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- [7] Niethammer U., James M. R., Rothmund S., Travelletti J., Joswig M. (2012). UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results // *Engineering Geology*. – 2012. – Vol. 128. – P. 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.012>
- [8] Zhou J., Jiang N., Li C. et al. A landslide monitoring method using data from unmanned aerial vehicle and terrestrial laser scanning with insufficient and inaccurate ground control points // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2024. – No. 16. – P. 4125-4140.
- [9] Lu Yan et al. Monitoring small-scale mass movement using unmanned aerial vehicle remote sensing techniques // *Catena*. – 2024. – Vol. 238. – 15 April 2024, 107885. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107885>
- [10] DJI Matrice 300 RTK – промышленный квадрокоптер https://www.drone.com.kz/products/drony/matrice_300_rtk/
- [11] RIEGL Software News <http://riegl.com>
- [12] Погода и климат // URL: электронный ресурс. <http://www.pogodaiklimat.ru/>
- [13] Jaboyedoff M., Derron M.-H. Chapter 7. Landslide analysis using laser scanners // *Developments in Earth Surface Processes*. – 2020. – Vol. 23. – P. 207-230. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00007-2>
- [14] Geirsson H., Sæmundsson P. (2024). Chapter 13. The role of GNSS monitoring in landslide research // *GNSS Monitoring of the Terrestrial Environment. Earthquakes, Volcanoes, and Climate Change*. – P. 243-255. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95507-2.00012-8>
- [15] Kemal Özgür Hastaoğlu, Yavuz Gül, Fatih Poyraz, Burak Can Kara (2019). Monitoring 3D areal displacements by a new methodology and software using UAV photogrammetry // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – Vol. 83, November 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101916>
- [16] J. Michael Duncan, Stephen G. Wright, Thomas L. Brandon. *Soil Strength and Slope Stability* // Wiley, October, 2014. – 336 p.
- [17] Оползень в Алматы: как выглядит место ЧП с высоты // URL: электронный ресурс. <https://informburo.kz/novosti/opolzen-v-almaty-kak-vyglyadit-mesto-chp-s-vysoty>
- [18] Жителей эвакуируют в безопасное место из-за сошедшего оползня в Алматинской области // URL: электронный ресурс. <https://www.caravan.kz/news/zhitelej-ehvakuiuyut-v-bezopasnoe-mesto-izza-soshedshego-opolznaya-v-almatinskoy-oblasti-992041/>

REFERENCES

- [1] Petrov N. F. *Landslide systems. Simple landslides (classification aspects)*. Kishinev: Shtiintsa, 1988. 226 p. (in Russ.).
- [2] Gulakyan K. A., Kuntzel V. V., Postoev G. P. *Forecasting of landslide processes*. Moscow: Nedra Publ., 1977. 135 p. (in Russ.).
- [3] Ivanov I. P., Trzhtinsky Yu.B. *Engineering geodynamics*. Saint Petersburg: Nauka Publ., 2001. 416 p. (in Russ.).
- [4] Trofimov V. T., Kalinin E. V. et al. *Engineering Geology of Russia. Engineering geodynamics of the territory of Russia*. Vol. 2. Moscow: KDU Publishing House, 2013. 816 p. (in Russ.).
- [5] Cruden D. M., Varnes D. J. (1996). Landslide types and processes. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* // Transportation Research Board Special Report. 247. P. 36-75). National Academy Press.
- [6] Eltner A., Kaiser A., Castillo C., Rock G., Neugirg F., Abellán A. Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments // *Earth Surface Dynamics*. 2016. Vol. 4, issue 2. P. 359-389. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- [7] Niethammer U., James M. R., Rothmund S., Travelletti J., Joswig M. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results // *Engineering Geology*. 2012. Vol. 128. P. 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.012>
- [8] Zhou J., Jiang N., Li C. et al. A landslide monitoring method using data from unmanned aerial vehicle and terrestrial laser scanning with insufficient and inaccurate ground control points // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024. No. 16. P. 4125-4140.
- [9] Lu Yan et al. Monitoring small-scale mass movement using unmanned aerial vehicle remote sensing techniques // *Catena*. 2024. V. 238. 15 April 2024, 107885. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107885>
- [10] DJI Matrice 300 RTK – industrial quadcopter https://www.drone.com.kz/products/drony/matrice_300_rtk/
- [11] RIEGL Software News <http://riegl.com>
- [12] Weather and climate // URL: electronic resource. <http://www.pogodaiklimat.ru/>
- [13] Jaboyedoff M., Derron M.-H. Chapter 7. Landslide analysis using laser scanners // *Developments in Earth Surface Processes*. 2020. Vol. 23. P. 207-230. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00007-2>
- [14] Geirsson H., Sæmundsson P. Chapter 13. The role of GNSS monitoring in landslide research // *GNSS Monitoring of the Terrestrial Environment. Earthquakes, Volcanoes, and Climate Change*. 2024. P. 243-255. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95507-2.00012-8>
- [15] Kemal Özgür Hastaoğlu, Yavuz Gül, Fatih Poyraz, Burak Can Kara. Monitoring 3D areal displacements by a new methodology and software using UAV photogrammetry // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 83, November 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101916>
- [16] J. Michael Duncan, Stephen G. Wright, Thomas L. Brandon. *Soil Strength and Slope Stability* // Wiley, October, 2014. 336 p.

[17] Landslide in Almaty: what does the emergency site look like from a height? // URL: electronic resource. <https://informburo.kz/novosti/opolzen-v-almaty-kak-vyglyadit-mesto-s-vysoty> (in Russ.).

[18] Residents are evacuated to a safe place due to a landslide in the Almaty region // URL: electronic resource. <https://www.caravan.kz/news/zhitelej-chvakuiruyut-v-bezopasnoe-mesto-iz-za-soshedshego-opolznaya-v-almatinskoy-oblasti-992041/> (in Russ.).

Е. Е. Халыков¹, М. М. Тоғыс², Ю. Ф. Лый^{*3}, Қ. С. Оразбекова⁴, Ұ. Р. Алдаберген⁵

¹ PhD, аға ғылыми қызметкер («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; e.halykov@mail.ru)

² Ғылыми қызметкер («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; maulenmm@mail.ru)

^{3*} Г. ғ. к., аға ғылыми қызметкер («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; uisya_lyi77@mail.ru)

⁴ PhD, аға ғылыми қызметкер («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; kuralay_orazbekova@mail.ru)

⁵ Кіші ғылыми қызметкер, PhD докторант («География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; aldabergen_u@mail.ru)

ҚАСКЕЛЕҢ ӨЗЕНІ АҢҒАРЫНДАҒЫ СЫРҒЫМАЛАРДЫ ҮШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП ЗЕРТТЕУ

Аннотация. Бұл мақалада Іле Алатауы (Қазақстан) аумағындағы Қаскелең өзенінің алқабында орналасқан инфрақұрылым мен саяжайларға, сондай-ақ автомобиль жолына қауіп төндіретін сырғыма көшкін ҰҰА (ұшқышсыз ұшатын аппарат) арқылы алынған деректер негізінде зерттелді. Жоғары дәлдіктегі цифрлық биіктік үлгілері негізінде баяу қозғалатын көшкіннің морфометриялық сипаттамалары, деформация аймақтары анықталды, еңіс тұрақтылық параметрлері есептелді. Көшкін шамадан тыс суару кезінде беріктігін жоғалтатын лесс тәрізді саздарда дамиды, жылжу жылдамдығы 59 см/жылға дейін болатыны анықталды. Тұрақтылық коэффициентін есептеу көлбеу >15° аудандар үшін критикалық күйді көрсетті. Ғаламдық навигациялық спутниктік жүйе арқылы аумақты бақылау және дренаждық жүйелер мен геогридті күшейту сияқты инженерлік шешімдерді енгізу ұсынылады. Нәтижелер таулы аймақтардағы сырғыма көшкін қаупін болжау үшін ҰҰА технологияларын интеграциялау қажеттілігін көрсетеді.

Түйін сөздер: сырғымалар, Қаскелең өзені, мониторинг, ҰҰА, Жер бедерінің сандық үлгісі

Ye. Ye. Khalykov¹, M. M. Togys², Yu. F. Lyy^{*3}, K. S. Orazbekova⁴, U. R. Aldabergen⁵

¹ PhD, Senior Researcher (JSC « Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; e.halykov@mail.ru)

² Research Associate (JSC « Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; maulenmm@mail.ru)

^{3*} Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher (JSC « Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; uisya_lyi77@mail.ru)

⁴ PhD, Senior Researcher (JSC « Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; kuralay_orazbekova@mail.ru)

⁵ Junior Researcher, PhD Student (JSC « Institute of Geography and Water Security», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; aldabergen_u@mail.ru)

INVESTIGATION OF THE LANDSLIDE IN THE KASKELLEN RIVER VALLEY USING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

Abstract. This article presents a study of a slow-moving landslide in the Kaskelen River valley (Ile Alatau, Kazakhstan), which poses a threat to local infrastructure and a dacha settlement. The investigation was conducted using data obtained from an unmanned aerial vehicle (UAV). High-precision digital elevation models were used to analyze the morphometric characteristics of the landslide, identify deformation zones, and calculate slope stability parameters. The landslide occurs in loess-like loams that lose strength when saturated with water, with a maximum recorded displacement rate of up to 59 cm per year. Stability coefficient calculations indicated critical conditions in areas with slopes greater than 15°. Monitoring using global navigation satellite systems (GNSS) is recommended, along with engineering measures such as drainage systems and geogrid reinforcement. The findings highlight the importance of integrating UAV technologies with traditional field methods for effective landslide risk assessment in mountainous regions.

Keywords: landslides, Kaskelen River, monitoring, UAV, digital terrain model.