

Опасные экзогеодинамические процессы Қауіпті экзогеодинамикалық процестер Dangerous exogeodynamic processes

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-3-45-57.25>

МРНТИ 39.21/39.23.15
УДК 551.3/796.5

С. А. Тарихазер^{*1}, С. Г. Мамедов², З. А. Гамидова³

^{1*} Д.г.н., доцент, главный научный сотрудник

(Институт географии им. академика Г. А. Алиева, Баку, Азербайджан; kerimov17@gmail.com)

² К. г. н. (Производственное объединение «Азнефть», SOCAR; seyturm@gmail.com)

³ К. г. н., доцент, старший научный сотрудник (Институт географии им. академика Г. А. Алиева, Баку, Азербайджан; zernura@gmail.com)

ПРИМЕНЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО МЕТОДА В ИССЛЕДОВАНИИ ОПОЛЗНЕВОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ БАССЕЙНА РЕКИ АГСУЧАЙ

Аннотация. С помощью количественного метода анализируются опасные оползневые процессы, протекающие в селеопасном бассейне реки Агсучай, с учетом активного развития туристско-рекреационной деятельности в Шамахи-Исмаиллинском регионе. С целью выявления оползневой восприимчивости и вероятного проявления оползней определен «вес» 9 факторов, взаимосвязанных с оползнями, – гипсометрия, углы наклона (крутизна склонов), экспозиция склонов, геологическое строение (литология), расстояние от разломов, среднегодовая сумма осадков, расстояние до эрозионной сети, расстояние до дорог, а также землепользование. Сложив все без исключения факторы оползнеобразования и перемножив их на свой «вес», мы составили карту оползневой восприимчивости селеопасного бассейна реки Агсучай. Достоверность полученных моделей проанализирована благодаря оценке AUC ROC (площадь под кривой ошибок) в 72%, которая продемонстрировала достаточно высокую эффективность примененного метода.

Ключевые слова: оползневая восприимчивость, селеопасный бассейн, геосистема, селевой риск, ущерб, оползневая опасность.

Введение. В последние годы наблюдается ускоренное задействование в хозяйственный оборот горных и предгорных зон, подвергающихся влиянию селевых процессов. Исследование селей все еще весьма актуально в целях устранения чрезвычайных последствий, а также для обоснования и выработки способов по охране регионов и отраслей хозяйства от их воздействия, усовершенствования методов их предвидения [1].

Селевой процесс формируется многочисленными факторами, среди которых главными выступают литология коренных пород, определяющих твердую составляющую селевых процессов и характеризующихся трещиноватостью и выветренностью. Выявление закономерностей формирования и накопления твердой составляющей в корреляции с геологической и геоморфологической обстановкой позволит спроцировать формирование разнотипных селевых потоков и обосновать методы охраны областей, испытывающих их воздействие.

Проблема проявления селевых потоков актуальна для Азербайджана в силу мирового изменения климата, неблагоприятных экологических последствий от ошибочных решений людей и пр. В республике выявляются риски проявления селей, разрабатываются планы по борьбе с ними, внедряются современные методы по уменьшению и устранению их воздействия на сооружения. Страна входит в число 180 стран мира, ратифицировавших документ Азиатского центра снижения риска стихийных бедствий (АЦСРСБ) на 2015-2035 гг.

Одним из регионов Азербайджана, наиболее подверженных воздействию селей, является южный склон Большого Кавказа, конкретно Шамахи-Исмаиллинский район, где исключительно селеопасным бассейном является р. Агсучай (рисунки 1, 2).

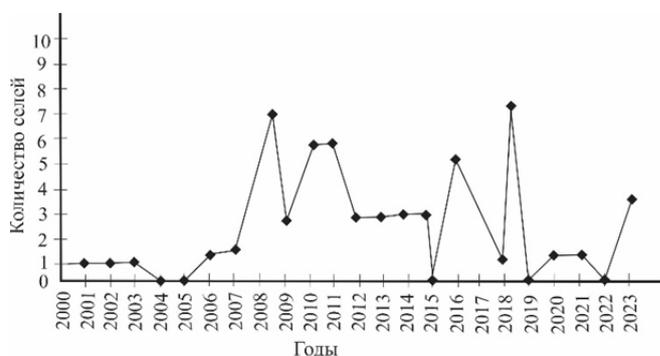


Рисунок 1 – Количество селей на р. Агсучай за 2000-2023 гг.

Figure 1 – The number of mudflows on the Agsuchai River in 2000-2023

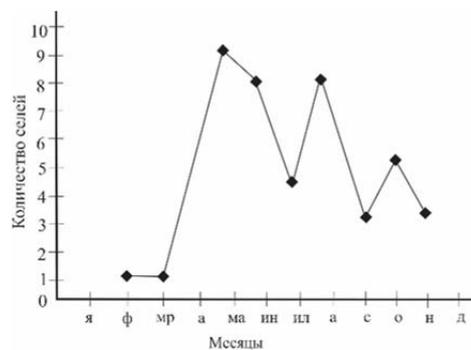


Рисунок 2 – Количество прошедших селей по месяцам за 2000-2023 гг.

Figure 2 – The number of past mudflows by months for 2000-2023

Из рисунка 1 следует, что с 2000 по 2023 г. на р. Агсучай прошло 42 наиболее катастрофических селевых потока. Приведем несколько примеров: селевой поток, прошедший 30 мая 2013 г., разрушил дорогу города Агсу, многочисленные заборы, электрические столбы. Дворы жилых домов и подвалы были затоплены толстым слоем ила. Селевой поток 10 октября 2016 г. разрушил селезащитные укрепления в селах Мешадганлы и Агаларбейли и мост в городе Агсу. 3 июня 2018 г. селевой поток разрушил дорогу, соединявшую село Мешадганлы с населением 1500 жителей с районным центром, линии электропередачи и телефонные столбы, прервано водо- и газоснабжение села, полностью вышли из строя оросительные каналы. 4 августа 2020 г. селевой поток повредил участок дороги Шамахи-Исмаиллы. Несколько частных домов и центр отдыха с находящимися на его территории коттеджами затопило илом. Сель унес большое число домашней птицы и скота. 7 сентября 2023 г. сель повредил столбы и провода электропередачи и связи. Была прекращена подача электроэнергии в некоторые села, в том числе в город Агсу. Селевой поток повредил участок дороги Агсу-Исмаиллы.

Хотелось бы отметить, что Шамахи-Исмаиллинский район считается одним из крупных рекреационных и курортных регионов республики. Тысячи людей в год посещают такие достопримечательности, как Сафари-парк, Шамахинская обсерватория, 5-звездочные отели «Шамахи-Палас-Шерадилль», «Басгал-Ресорт», курортный отель «Сакит-гель» и многие другие, возведенные в горных или высокогорных зонах, где масштабно развиты оползневые процессы. Они внезапны, непредсказуемы и тесно связаны с селевыми процессами. Анализ развития и проявления оползней в Шамахи-Исмаиллинском районе обеспечит урегулирование многочисленных хозяйственных и практических проблем, позволит предугадать опасные последствия, спровоцированные неоправданным преобразованием рельефа, использовать результаты исследования в целях оптимальной эксплуатации, а также уменьшения ущерба и оползневого риска [2, 3].

Цель исследования – определить главные причины формирования и проявления оползней в бассейне р. Агсучай, являющейся селеопасной рекой не только Шамахи-Исмаиллинского района, но и всего южного склона Большого Кавказа в границах Азербайджана. Кроме того, необходимо вскрыть условия их образования, оценить восприимчивость местности к оползневым процессам и разработать методы предотвращения оползней и селей, уменьшения тяжести их последствий и защиты от этих природных явлений.

Характеристика района исследования. В строении Шамахи-Исмаиллинского района преобладают третичные осадочные и вулканогенно-осадочные отложения мелового периода. Река Агсучай протекает по волнистому, относительно широкому плато, возвышающемуся порою до

высоты 1000 м. На западе бассейн обрамлен Гюрдживанским плато, на востоке – Лянгябизским хребтом. Средняя густота речной сети $0,46 \text{ км/км}^2$. Большинство селевых очагов, а именно оползни и оползни-потоки (ишгыны), наблюдается на высоте свыше 1200 м. Главные факторы масштабного проявления оползней – наличие разрывных нарушений и глинистых отложений большой мощности, а также широкое развитие крутых склонов в Шамахи-Исмаиллинском районе.

В селеопасном бассейне р. Агсучай в последнее время наблюдается увеличение числа оползней (рисунок 3).



Рисунок 3 – Оползневые процессы в долине р. Агсучай
Figure 3 – Landslide processes in the valley of the Agsuchai River

К примеру, если в прошлом оползни проявлялись лишь в верхних зонах среднегорья, а также в высокогорье, сейчас они уже масштабно формируются в предгорных и низкогорных зонах селеопасного бассейна р. Агсучай. Здесь помимо природных факторов огромное воздействие оказывает антропогенная (прокладка линейной инфраструктуры, подрезка склонов и мн. др.) деятельность [4].

Селеопасный бассейн р. Агсучай обладает сложным геолого-геоморфологическим строением. Основой служит складчато-глыбовое строение рельефа, где комбинируются мелкие и крупные, простые и сложные, отрицательные и положительные структуры, тектонические покровы и разломы.

Вдоль долины р. Агсучай проходит мощное Западно-Каспийское нарушение, по которому заложена долина реки. Он пересекает восточный сегмент Говдагского хребта, осевую зону Ниалдагского хребта и Лахыджскую котловину, осложняя их строение, что в конечном итоге и вызывает активизацию оползневых процессов.

В истоковой части долина р. Агсучай представляет собой ущелье с крутыми склонами, тесниной и водопадами. В средней части долина реки расширяется, периодически срезает изверженные породы с прослоями известняков и песчаников, формируя теснину с крутыми скалистыми склонами. Притокам селеопасной р. Агсучай присуща приуроченность их долин к запрокинутым на юг складкам. Северные склоны отвесные, а южные пологие, что совпадает с напластованием слагающих отложений. Долины притоков более глубокие, сформированные в сравнительно легко разрушающихся породах большой мощности. В нижней части долина р. Агсучай выделяется широкой ящикообразной долиной с речными террасами и высоко приподнятой поймой.

Агсучай, проходя через низкогорье и предгорье, формирует конус выноса, образованный значительными по объему отложениями селевых потоков (рисунок 4).

Среднегорье бассейна селеопасной р. Агсучай выделяется формированием обвальных и осыпных склонов из массивных песчано-известняковых пород юры и мела, высокогорье – зоной нивально-денудационного влияния и гравитационных процессов.

Территория среднего течения селеопасной р. Агсучай изобилует мощными оползневыми массивами, амфитеатрами, цирками, медленно сползающими потоками, стенками отрыва оползней, которые осложняют рельеф, сглаживая его структурную специфику. Примером могут служить



Рисунок 4 – Верховье конуса выноса р. Агсучай

Figure 4 – Upper reaches of the Agsuchai River outflow cone

структуры низких порядков, черты которых сглажены гравитационными процессами и формами рельефа. Мощные оползневые потоки, переходящие в сели с внушительными конусами выноса, занимают дно котловин и их склонов. По данным Н. Ш. Ширинова (1982), интенсивная раздробленность бортов продольного участка долины р. Агсучай обязана резкой расчлененности нижнемеловых известняков, мергелей и песчаников, чередой энергичных в новейшем этапе продольных нарушений, строению склонов, сложенных слоями, падающими на север.

свидетельствует, что важным фактором формирования оползней служит геолого-геоморфологическое строение.

Материалы и методы исследования. Оползни представляют огромную угрозу, что мотивирует исследователей находить более целесообразные способы и методы их прогнозирования. За последнее время появилось множество способов прогноза оползней, но чаще всего используют вероятностно-статистические методы. Опубликовано большое число работ по исследованию оползневой восприимчивости [5-17]. К примеру, Чалкова Ю. С., Черепанов Б. М. [18] оползневые процессы изучали методом сравнительно-геологического анализа условий их развития. Фоменко И. К., Пендин В. В., Нгуен Ч. К. [19] для оценки оползневой опасности территорию исследования делят на зоны, которые друг от друга отличаются природными условиями образования оползней, по активности и характеру воздействия антропогенного фактора. Анализ оползневых факторов ученые проводят способом взвешенных сумм или взвешенных произведений. Леонова А. В., Строкова Л. А., Никитенкова А. Н. [20] определяют закономерности развития оползней, дают оценку активности их образования и проводят прогноз вероятности их проявления.

Оползневая восприимчивость (landslide susceptibility) – «это ареальная допустимость оползней, проявляющихся в конкретном регионе, с учетом местных ситуаций, свидетельствующая, где, возможно, образуются оползни» [21, 22], т.е. оползневая восприимчивость идентифицируется как вероятность образования оползня на конкретной территории, оцениваемая на основе качественной и количественной интерпретации ряда природных и антропогенных факторов, провоцирующих формирование оползней. Картирование оползневой восприимчивости (LSM – Landslide Susceptibility Mapping) – «это алгоритм выявления пространственной дифференциации и систематизации участков территории на базе их предрасположенности к развитию оползней. На это воздействуют топография, геология, особенности свойств грунтов, климат, растительность и антропогенное влияние» [23]. Пространственный анализ с помощью ГИС «объясняет взаимосвязи между множественными факторами устойчивости склонов и формированием оползневых процессов, служа продуктивным подходом для оценки оползневой восприимчивости» [24, 25].

Как отмечалось, при анализе оползневой восприимчивости чаще всего используют статистический метод, где оползни и формирующие их причины служат главными составляющими при создании модели восприимчивости к оползням, «дабы предвидеть образование оползней в перспективе» [26]. Обычно парадигмы оценки оползневой восприимчивости подразделяют на качественные и количественные [5, 10, 27]. С недавних пор наблюдается рост числа количественных методов при исследовании оползневой восприимчивости по причине того, что результаты этих методов более достоверны. Однако качественные методы все еще актуальны при анализе оползневой восприимчивости на крупных ареалах, и вдобавок, если количественные методы нереализуемы вследствие неполноты данных.

В работе в целях оценки оползневой восприимчивости и разработки карт вероятного формирования оползней в селеопасном бассейне р. Агсучай применены способы соотношения частот (англ. Frequency Ratio method – FR) и индекса энтропии (Index of entropy).

Способ соотношения частот основан на выявляемых соотношениях между дифференциацией оползней и отдельным из зависимых от них факторов для того, чтобы установить взаимосоответствие между местами обнаружения процесса и факторами, его провоцирующими. Следовательно, каждый фактор делится на ряд групп, а степень частоты (FR) для любой группы факторов устанавливается по уравнению

$$F_{ij} = \frac{N_i/N}{P_i/P}, \quad (1)$$

где N_i – число точек (пикселей) оползней в группе факторов i ; N – сумма числа точек (пикселей) оползней на карте территории изучения; P_i – сумма числа точек (пикселей) в группе факторов i ; P – общая сумма числа точек (пикселей) на карте территории изучения.

Затем для выявления «веса» любого фактора, образующего оползней, применен индекс энтропии Шеннона. «Энтропия – мера оценки бессистемности, непредсказуемости, неясности и неустойчивости конкретной системы». Между функцией энтропии и уровнем бессистемности в системе существует согласованность, описываемая формулой Больцмана. Шеннон воспользовался этим принципом, усовершенствовал его и создал «энтропийную модель для теории информации» [28]. В настоящее время принцип информационной энтропии широко используется для выявления индекса «веса» опасных явлений, в том числе в качестве совокупного экологического анализа природных процессов, таких, как оползней, обвалы, сели и др.

Итогом этого анализа служит выделение на изучаемой территории пяти зон вероятностного формирования оползневой процесса, таких, как весьма низкая, низкая, средняя, высокая и весьма высокая.

При анализе оползневой восприимчивости результаты сверяются с оценкой AUCROC (площадь под кривой ошибок).

ROC-кривая, или кривая ошибок (англ. Receiver Operating Characteristic), – график, дающий возможность понять качество бинарной классификации, демонстрирует зависимость числа правильно классифицированных положительных примеров от ошибочно систематизированных отрицательных примеров. Площадь под ROC-кривой AUC (Area Under Curve) служит объединенной особенностью классификации, неподконтрольной показателю суммы ошибок. Чем выше значимость AUC, тем качественнее оценка восприимчивости.

Инвентаризация оползней. Важным элементом методологии FR служит создание инвентаризационной карты оползней (ИКП). Такая карта может создаваться как на базе полевых работ,

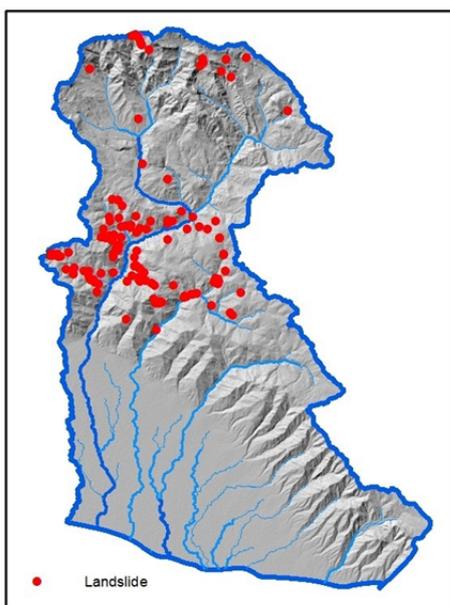


Рисунок 5 – ИКП селеопасного бассейна р. Агсучай

Figure 5 – LIM of the mudflow – prone basin of the Agsuchai River

так и методом интерпретации мультиспектральных изображений, полученных благодаря дистанционному зондированию. ИКП (LIM – Landslide Inventory Mapping) – карта, где указано количество оползней. Кроме того, эта карта содержит такую информацию, как геометрические параметры оползней (размеры, площадь, глубина захвата склонового массива оползневыми деформациями), специфика геолого-геоморфологического строения (литология, структура, свойства грунтов) и гидрогеологических условий.

Создание ИКП выполняется с помощью алгоритма возрастания контрастов, рекомендованного Гондом и Броньоли в 2005 г. Основой методологии является комбинирование спектральных диапазонов для разработки индексов растительности (NDVI) и индексов влажности (NDWI). Затем эти слои соединяются со средним инфракрасным интервалом (MIR) для повышения контрастности территории (рисунок 5).

В селеопасном бассейне р. Агсучай выделено более 120 оползней. В основном оползни зафиксированы в Лахыдж-Мюдринской внутригорной впадине, на склонах Ниалдагского и Говдагского хребтов и по Аджичайскому тектоническому нарушению.

Результаты исследования. Опираясь на имеющиеся данные, специфику оползней и взаимосвязи между формированием склоновых деформаций и факторами, провоцирующими оползни, для графического представления карт оползневой восприимчивости и вероятностного проявления оползней взяты 9 факторов, взаимосвязанных с оползнями, – гипсометрия, углы наклона (крутизна склонов), экспозиция склонов, геологическое строение (литология), расстояние от разломов, среднегодовая сумма осадков, расстояние до эрозионной сети, расстояние до дорог и землепользование (рисунок 6).

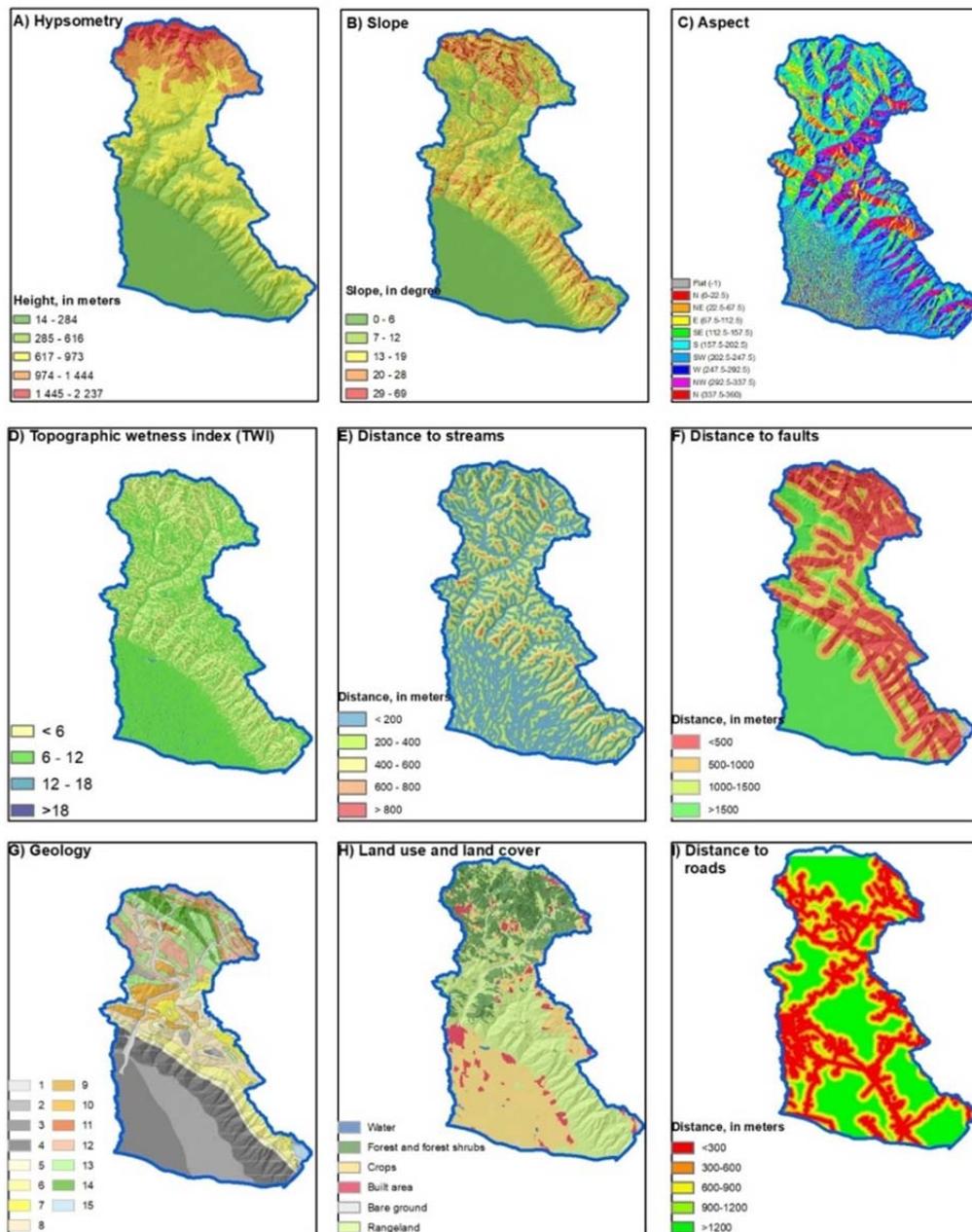
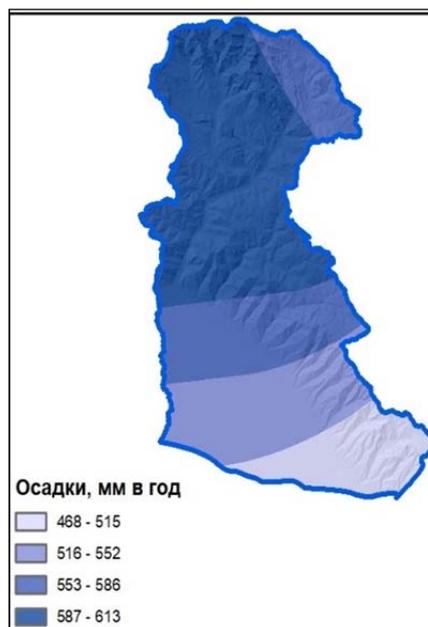


Рисунок 6 – Карты факторов оползнеобразования в селеопасном бассейне р. Агсучай
 Figure 6 – Maps of landslide factors in the mudslide-prone basin of the Agsuchai River

Рисунок 7 – Карта среднемесячной суммы осадков в селеопасном бассейне р. Агсучай

Figure 7 – Map of the average monthly precipitation in the mudflow basin of the Agsuchai River



Карты гипсометрии, крутизны и экспозиции склонов созданы с помощью цифровой модели рельефа (ЦМР) с разрешением 12,5-30 м. Расстояния до разломов, дорог и эрозионной сети оценены посредством инструмента Евклидово расстояние в ArcGIS. Карта среднемесячной суммы осадков создана способом интерполяции данных о сумме осадков в близрасположенных поселениях (рисунок 7). Карта землепользования (Land use and land cover map) создана на базе обучающей систематизации в информационной установке ArcGIS.

Материалы о геологическом строении (литологии) и глубинные разломы оцифрованы с геологической карты Горно-Ширванского экономического района масштаба 1:200 000. Затем в целях оценки все карты преобразованы в растровый формат, чтобы рассчитать «вес» классов и факторов и в конечном итоге составить карту оползневой восприимчивости.

Так как крутизна склона является одним из существенных факторов формирования оползней, этот параметр получен на базе ЦМР благодаря инструментам пространственной оценки и разделен на 5 групп на основании алгоритма естественных интервалов (границ): 0-6, 6-12, 12-19, 19-28 и 28-69°.

Значимым источником преобразования качеств грунта значится экспозиция склонов. Воздействие экспозиции склонов выражается в различиях в температуре и влажности. Такие различия обозначают изменения свойств почвы по причине их влияния на вегетационные и микроклиматические условия. К примеру, освещенность, осадки, засушливый ветер и пр. влияют на развитие оползней. Экспозицию склонов подразделили на 8 групп: плоская (-1°), северная ($0-22,5^\circ$; $337,5-360^\circ$), северо-восточная ($22,5-67,5^\circ$), восточная ($67,5-112,5^\circ$), юго-восточная ($112,5-157,5^\circ$), южная ($157,5-202,5^\circ$), юго-западная ($202,5-247,5^\circ$), западная ($247,5-292,5-292,5-337,5^\circ$), северо-западная ($292,5-337,5^\circ$).

Важным фактором, конкретизирующим устойчивость склона, считается расстояние до рек, так как реки подмывают основание склона, тем самым способствуя развитию эрозионных процессов. Значит, чем дальше от реки, тем меньше вероятность развития оползня.

По параметру «расстояние до рек» выделено 5 групп посредством инструмента Евклидово расстояние ArcGIS: менее 200, 200-400, 400-600, 600-800 и свыше 800 м.

По параметру «расстояние до дорог» определены 4 группы посредством ArcGIS: менее 6, 6-12, 12-18 и свыше 18 м.

По параметру «расстояние до разломов» установлены 4 группы: менее 500, 500-1000, 1000-1500 и свыше 1500 м.

Обсуждение. В работе проведен анализ взаимосвязи между факторами, формирующими оползни. Паритеты частотностей (F_{ij}) и величины «веса» всех без исключения факторов (W_j) рассчитаны с помощью моделей FR и IoE (см. таблицу). Для селеопасного бассейна р. Агсучай значения LSI при составлении карт индекса оползневой восприимчивости найдены по формуле

$$LSI = [(гипсометрия \times W_j) + (углы наклона \times W_j) + (экспозиция \times W_j) + (геологическое строение \times W_j) + (дальность до разломов \times W_j) + (дальность до водотоков \times W_j) + (дальность до дорог \times W_j) + (землепользование и растительный покров \times W_j) + (сумма атмосферных осадков \times W_j)]. \quad (2)$$

Оценка взаимосвязи между факторами, формирующими оползни, и распространением оползней
Assessment of the relationship between factors shaping landslides and landslide distribution

Фактор	Класс фактора	Площадь класса P_i	Площадь, занятая оползнем N_i	FR (N_i / P_i)	«Вес» фактора W_i
1	2	3	4	5	6
Гипсометрия, м	14-284	306323400	4993,08222	0,005907426	3,83
	284-616	203414900	1314290,198	2,341629738	
	616-973	258086400	828851,6485	1,1639,1537	
	973-1444	117177100	49930,8222	0,154431429	
	1444-2237	54171620	393343,9215	2,631542192	
Углы наклона, град.	0-6	330906600	66019,64268	0,072005394	3,32
	6-12	227688500	841611,7475	1,334037325	
	12-19	217790500	1162278,583	1,926054587	
	19-28	121181000	483219,4015	1,439153503	
	28-69	37695560	38280,29702	0,3666507096	
Экспозиция	Север	26740180	110957,3827	1,497576918	1,00
	Северо-восток	64591080	272955,1613	1,525162171	
	Восток	82213330	207490,3056	0,910862518	
	Юго-восток	131276500	357282,7722	0,982250699	
	Юг	173426400	601389,014	1,251519271	
	Юго-запад	184496600	494869,9267	0,968054829	
	Запад	131472300	309016,3107	0,848290108	
	Северо-запад	90236100	163107,3525	0,652364743	
Геологическое строение	1	29494140	97087,70982	1,193028445	2,86
	2	140260100	0	0	
	3	120623500	0	0	
	4	139786350	0	0	
	5	51286170	155895,1226	1,101677652	
	6	61790515	164216,9263	0,963204235	
	7	33116900	42718,59232	0,467508526	
	8	108513000	760612,8581	2,540412095	
	9	11266060	221914,7653	7,138984167	
	10	43814306	848269,1903	7,01681515	
	11	5965070	4438,295306	0,269663974	
	12	59204091,1	12760,09901	0,078113232	
	13	98113539,1	128155,777	0,473403567	
	14	31160724,2	155340,3357	1,806753797	
	Вулканические брекчии	4806120	0	0	

Окончание таблицы					
1	2	3	4	5	6
Дальность до разломов, м	0-500	347749900	1543971,98	1,597895539	3,15
	500-1000	161212200	662415,5744	1,47879718	
	1000-1500	87413350	1543971,98	1,30424907	
	>1500	336260300	662415,5744	0,073035113	
Дальность до водотоков, м	<200	469655500	1388076,857	1,067794446	2,61
	200-400	277143300	763016,9347	0,994679918	
	400-600	140608000	338604,946	0,870035199	
	600-800	44409040	101710,9341	0,827465345	
	>800	4429420	0	0	
Дальность до дорог, м	<300	278845400	242441,8811	0,310793604	2,28
	300-600	165115200	315673,7536	0,683406856	
	600-900	116582400	367823,7235	1,127806665	
	900-1200	84719300	378364,6748	1,596452995	
	>1200	281064000	1287105,683	1,636955589	
Землепользование	Водоемы	2350633	21537	0,0856443955	5,26
	Леса и лесохозяйственные угодья	194466200	769	0,46585411	
	Пахотные земли	290814400	6154	0,017306357	
	Населенные пункты	50804620	14615	0,150578142	
	Территории с разреженной растительностью	9854127	101526,0051	3,738647165	
	Луга и пастбища	392064100	2204723,193	2,040573919	
Сумма атмосферных осадков, мм/год	468-515	120732192,2	0	0	8,77
	515-552	177959026	0	0	
	552-586	223405512,7	64355,28194	0,104399699	
	586-613	417074996,9	2527054,39	2,195883873	
<p><i>Примечание.</i> Геологические классы: 1 – голоцен, современные аллювиальные отложения – галька, гравий, пески, супеси, суглинки; 2 – голоцен, современные делювиально-пролювиальные отложения – гальки, суглинки, супеси, глины; 3 – средний и верхний плейстоцен, аллювиально-пролювиальные отложения – глины, суглинки, супеси, галька с прослоями вулканического пепла; 4 – эоплейстоцен, абшерон морские отложения – глины, пески, песчаники, известняки с прослоями вулканического пепла, суглинки, мергели, конгломераты; 5 – верхний плиоцен, ачкагыльские осадочные отложения – глины, вулканический пепел, брекчии, пески, песчаники, галька, известняки; 6 – нижний плиоцен, балаханские осадочные отложения – глины, суглинки, пески, песчаники, галька, гравелиты, конгломераты; 7 – верхний миоцен, понтийские осадочные отложения – пески, песчаники, глины, известняки, конгломераты, вулканические породы, пепел; 8 – нижний миоцен, верхнемайкопские осадочные отложения – сланцевые глины с прослоями глинистых сидеритовых конкреций, вулканический пепел, пески, песчаники, гравелиты, конгломераты; 9 – майкопские осадочные породы олигоцена и нижнего миоцена – глины, аргиллиты, песчаники, мергели; 10 – эоценовые (говундагская свита) осадочные отложения – глины, мергели, песчаники, глинистые доломиты, вулканический пепел, конгломераты; 11 – средний и верхний палеоцен (сумгаитская свита), осадочные месторождения – глины, мергели, песчаники; 12 – осадочные отложения нижнего палеоцена – известняки, песчаники, мергели, аргиллиты, глины; 13 – верхнемеловые вулканогенно-осадочные и осадочные отложения – туфопесчаники, базальты андезиты, порфириты, известняки, песчаники, мергели, аргиллиты, глины; 14 – нижнемеловой вулканогенно-осадочный и осадочные отложения – туфопесчаники, песчаники, мергели, известняки, аргиллиты, туфоконгломераты, туфы, туффиты, порфириты, андезиты.</p>					

С этой целью в среде программирования ArcGIS с использованием инструмента пространственной оценки «Калькулятор раstra», сложив все факторы оползнеобразования и перемножив на свои «веса», мы составили карту оползневой восприимчивости селеопасного бассейна р. Агсучай (рисунок 8).

С помощью способа систематизации истинных границ в среде программирования ArcGIS бассейн р. Агсучай разделен на 5 зон по потенциалу формирования оползней: весьма низкая, низкая, средняя, высокая и весьма высокая. Анализ данных показал, что зоны с весьма низкой, низкой, средней, высокой и весьма высокой вероятностью формирования оползней охватывают соответственно 17,98; 17,03; 24,64; 23,41 и 16,94% площади бассейна реки.

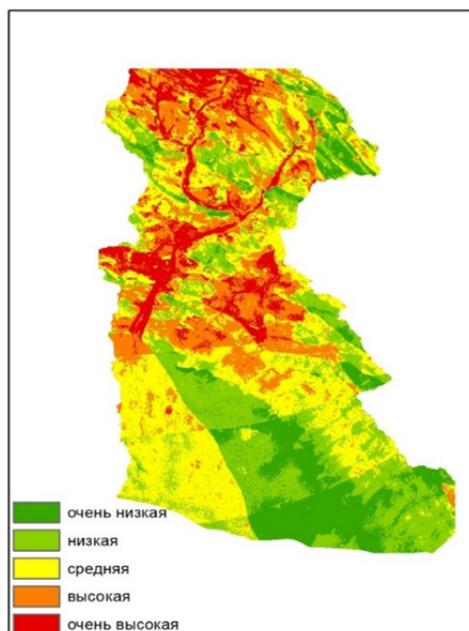


Рисунок 8 –
Карта оползневой восприимчивости
селеопасного бассейна р. Агсучай

Figure 8 –
Map of landslide susceptibility
of the mudslide-prone basin
of the Aghsu River

Зоны с высокой и весьма высокой оползневой восприимчивостью главным образом соответствуют Бабадагскому, Говдагскому, Ниалдагскому хребтам, Лахыдж-Мюдринской впадине и местами склонам Третичного плато (Аджичайская область). Все высокогорье бассейна располагается в зоне весьма высокой и высокой оползневой восприимчивости. Зоны низкой и весьма низкой восприимчивости выявлены в равнинной части и на плоских участках бассейна. Значение AUC 72% свидетельствует об эффективности данного подхода для картирования оползневой восприимчивости и вероятности формирования оползней в селеопасном бассейне р. Агсучай (рисунок 9).

Выводы. Оценка оползневой опасности значителен главным звеном национальной стратегии устранения и митигации последствий стихийных явлений в Азербайджане. Районирование территории по возможности формирования оползневого процесса считается базой для анализа оползневой опасности в этой связи с риском и планирования программ своевременного предвидения.

С этой целью впервые в Азербайджане и был проведен анализ формирования оползневого процесса в селеопасном бассейне р. Агсучай. Для оформления карт оползневой восприимчивости применялись статистические модели (на базе ГИС), позволившие обозначить важность каждого фактора, воздействующего на образование

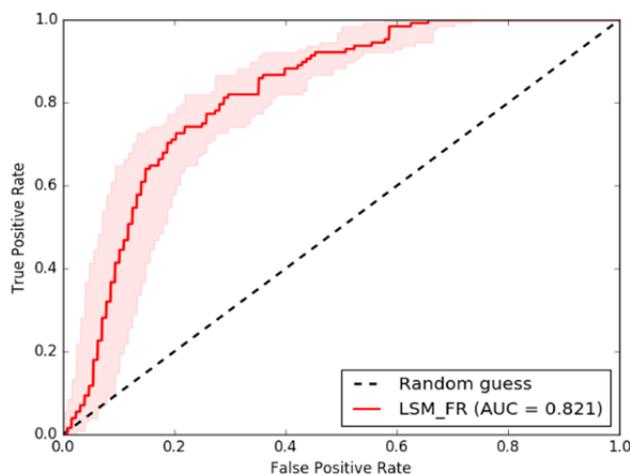


Рисунок 9 –
График, доказывающий
достоверность модели

Figure 9 –
A graph proving the reliability
of the model

оползневых процессов. Затем оценка восприимчивости была осуществлена за счет агрегирования итогов анализа отобранных факторов с помощью пространственных концептуальных формул. Район изучения по степени потенциального формирования оползней был разделен на пять зон: весьма низкая, низкая, средняя, высокая и весьма высокая. Правдивость извлеченных моделей проанализирована благодаря AUC ROC (площадь под кривой ошибок), выявившей высокую эффективность примененного подхода – 72%. Благодаря высокой достоверности используемый метод нами применяется для оценки оползневой восприимчивости по всем бассейнам рек Азербайджана.

Результаты вычислений принципиально значимы в целях анализа оползневой опасности и рисков, разработки стабильного землепользования и снижения урона от оползней на изучаемой территории.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тарихазер С. А. Геолого-геоморфологический анализ оползневых процессов в заповеднике «Гобустан» в целях туристско-рекреационной деятельности // География и водные ресурсы. – 2022. – № 2. – С. 19-27. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2022-2-19-27/09>
- [2] Tarikhazer S. A. Assessment of ecological strength and risk of geosystems of the north-eastern slope of the Great Caucasus (within Azerbaijan) // Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography». – 2022. – No. 56. – P. 264-267. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-20>
- [3] Tarikhazer S. A., The geographical prerequisites for the identification and prevention of dangerous geomorphological processes in the mountain geosystems of the Alpine-Himalayan belt (on the example of the Major Caucasus of Azerbaijan) // Journal of Geology, Geography and Geocology. – Dnepropetrovsk, 2020. – No. 1. – P. 176-187. DOI <https://doi.org/10.15421/112016>
- [4] Tarikhazer S. A., Mammadov S. G., Hamidova Z. A. Application of quantitative methods for the assessment of landslide susceptibility of the Aghsuchay river basin // Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography». – 2023. – No. 58. – P. 257-273. <https://doi.org/10.26565,2410-7360-2023-58-20>
- [5] Guzzetti F., Reichenbach P., Cardinali M., Galli M., Ardizzone F. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale // Geomorphology. – 2005. – Vol. 72, iss. 1. – P. 272-299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>.
- [6] Lee S., Pradhan B. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models // Landslides. – 2007. – Vol. 4. – P. 33-41.
- [7] Van Westen C.J., Castellanos E., Kuriakose S.L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview // Engineering Geology. – 2008. – Vol. 102. – P. 112-131.
- [8] Castellanos Abella EA., Van Westen CJ. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba // Geomorphology. – 2008. – Vol. 94. – P. 453-466.
- [9] Oh H.-J., Lee S. Cross-application used to validate landslide susceptibility maps using a probabilistic model from Korea // Environmental Earth Science. – 2011. – Vol. 64. – P. 395-409.
- [10] Пендин В. В., Фоменко И. К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. – М.: ЛЕНАНД, 2015. – 320 с.
- [11] Arabameri A., Pradhan B., Rezaei K., Lee C.-W. Assessment of landslide susceptibility using statistical- and artificial intelligence-based FR–RF integrated model and multiresolution DEMs // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, iss. 9. URL: <https://doi.org/10.3390/rs11090999>.
- [12] Cantarino I., Carrion M.A., Goerlich F., Martinez Ibañez V. A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps // Landslides. – 2019. – Vol. 16, iss. 2. – P. 265-282. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4>.
- [13] Mandal S., Mandal S. Statistical approaches for landslide susceptibility assessment and prediction. – Switzerland: Springer International Publishing, 2019. – 200 p.
- [14] Nahayo L., Mupenzi C., Habiyaremye G., Kalisa E., Udahogora M., Nzabarinda V., Li L. Landslides hazard mapping in Rwanda using bivariate statistical index method // Environmental Engineering Science. – 2019. – Vol. 36, iss. 8. – P. 892-902. URL: <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0493>.
- [15] Shano L., Raghuvanshi T. K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques—a review // Geoenvironmental Disasters. – 2020. – Vol. 7, iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0>.
- [16] Харченко С. В., Шварев С. В. Прогнозирование оползневой опасности в окрестностях Красной Поляны на основе линейного дискриминантного анализа // Вестник Московского государственного университета. Серия 5. География. – 2020. – № 3. – С. 22-33.
- [17] Roccati A., Paliaga G., Luino F., Faccini F., Turconi L. GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment // Land. – 2021. – Vol. 10, iss. 2. URL: <https://doi.org/10.3390/land10020162>.
- [18] Чалкова Ю. С., Черепанов Б. М. Оползневые процессы, их прогнозирование и борьба с ними // Ползуновский вестник. – 2007. – № 1-2. – С. 80-89.
- [19] Фоменко И. К., Пендин В. В., Нгуен Ч. К. Оценка ущерба, опасности и риска от оползневых процессов (на примере Северо-Западного Вьетнама) // Сб. науч. тр. XIII Общерос. науч.-практич. конф. и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». – 2017. – С. 27-34.
- [20] Леонова А. В., Строкова Л. А., Никитенкова А. Н. Оценка оползневых процессов на территории г. Томска с использованием ГИС-технологий // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. «Геология». – 2021. – № 1. – С. 94-103.
- [21] Sestraş P., Bilaşco Ş., Roşca S., Naş S., Bondrea M.V., Gălgău R., Vereş I., Sălăgean T., Spalević V., Cîmpeanu S.M. Landslides susceptibility assessment based on GIS statistical bivariate analysis in the hills surrounding a metropolitan area // Sustainability. – 2019. – Vol. 11, iss. 5. URL: <https://doi.org/10.3390/su11051362>.
- [22] Kose D. D., Turk T. GIS-based fully automatic landslide susceptibility analysis by weight-of-evidence and frequency ratio methods // Physical Geography. – 2019. – Vol. 40, iss. 5. – P. 481-501. URL: <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1559583>.
- [23] Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning // Engineering Geology. – 2008. – Vol. 102, iss. 3. – P. 85-98. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>
- [24] Van Westen C.J., Van Asch T.W.J., Soeters R. Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? // Bulletin of engineering geology and the environment. – 2006. – Vol. 65, iss. 2. – P. 167-184. URL: <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>.
- [25] McColl S.T. Chapter 2. Landslide causes and triggers // Landslide hazards, risks and disasters / Eds. J. F. Shroder, T. Davies. – Boston: Academic Press, 2015. – P. 17-42. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396452-6.00002-1>.

[26] Tiranti D., Cremonini R. Editorial: landslide hazard in a changing environment // *Frontiers in Earth Science*. – 2019. – Vol. 7, iss. 3. URL: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00003>.

[27] Gaidzik K., Ramírez-Herrera M.T. The importance of input data on landslide susceptibility mapping // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11, iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98830-y>.

[28] Shannon C.E. Prediction and entropy of printed English // *The Bell System Technical Journal*. – 1950. – Vol. 30. – P. 50-64.

REFERENCES

[1] Tarikhazer S. A. Geological and geomorphological analysis of landslide processes in the reserve «Gobustan» for the purpose of tourist and recreation activities // *Geography and water resources*. 2022. No. 2. P. 19-27. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2022-2-19-27/09> (in Russ.).

[2] Tarikhazer S. A. Assessment of ecological strength and risk of geosystems of the north-eastern slope of the Great Caucasus (within Azerbaijan) // *Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography.»* 2022. No. 56. P. 264-267. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-20>

[3] Tarikhazer S. A. The geographical prerequisites for the identification and prevention of dangerous geomorphological processes in the mountain geosystems of the Alpine-Himalayan belt (on the example of the Major Caucasus of Azerbaijan) // *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. Dnepropetrovsk, 2020. No. 1. P. 176-187. DOI <https://doi.org/10.15421/112016>

[4] Tarikhazer S. A. Mammadov S. G., Hamidova Z. A. Application of quantitative methods for the assessment of landslide susceptibility of the Aghsuchay river basin // *Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography.»* 2023. No. 58. P. 257-273. <https://doi.org/10.26565,2410-7360-2023-58-20>

[5] Guzzetti F., Reichenbach P., Cardinali M., Galli M., Ardizzone F. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale // *Geomorphology*. 2005. Vol. 72, iss. 1. P. 272-299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>

[6] Lee S., Pradhan B. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models // *Landslides*. 2007. Vol. 4. P. 33-41.

[7] Van Westen C.J., Castellanos E., Kuriakose S.L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview // *Engineering Geology*. 2008. Vol. 102. P. 112-131.

[8] Castellanos Abella EA., Van Westen CJ. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba // *Geomorphology*. 2008. Vol. 94. P. 453-466.

[9] Oh H.-J., Lee S. Cross-application used to validate landslide susceptibility maps using a probabilistic model from Korea // *Environmental Earth Science*. 2011. Vol 64. P. 395-409.

[10] Pendin V. V., Fomenko I. K. Methodology for assessing and forecasting landslide hazard. M.: LENAND, 2015. 320 p. (in Russ.).

[11] Arabameri A., Pradhan B., Rezaei K., Lee C.-W. Assessment of landslide susceptibility using statistical- and artificial intelligence-based FR–RF integrated model and multiresolution DEMs // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, iss. 9. URL: <https://doi.org/10.3390/rs11090999>.

[12] Cantarino I., Carrion M. A., Goerlich F., Martinez Ibañez V. A ROC analysis-based classification method for landslide susceptibility maps // *Landslides*. 2019. Vol. 16, iss. 2. P. 265-282. URL: <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1063-4>.

[13] Mandal S., Mondal S. Statistical approaches for landslide susceptibility assessment and prediction. Switzerland: Springer International Publishing, 2019. 200 p.

[14] Nahayo L., Mupenzi C., Habiyaemye G., Kalisa E., Udahogora M., Nzabarinda V., Li L. Landslides hazard mapping in Rwanda using bivariate statistical index method // *Environmental Engineering Science*. 2019. Vol. 36, iss. 8. P. 892-902. URL: <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0493>.

[15] Shano L., Raghuvanshi T. K., Meten M. Landslide susceptibility evaluation and hazard zonation techniques—a review // *Geoenvironmental Disasters*. 2020. Vol. 7, iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00152-0>.

[16] Kharchenko S. V., Shvarev S. V. Forecasting landslide hazard in the vicinity of Krasnaya Polyana based on linear discriminant analysis // *Bulletin of Moscow State University. Episode 5. Geography*. 2020. No. 3. P. 22-33 (in Russ.).

[17] Roccati A., Paliaga G., Luino F., Faccini F., Turconi L. GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment // *Land*. 2021. Vol. 10, iss. 2. URL: <https://doi.org/10.3390/land10020162>.

[18] Chalkova Yu. S., Cherepanov B. M. Landslide processes, their forecasting and combating them // *Polzunovsky vestnik*. 2007. No. 1-2. P. 80-89 (in Russ.).

[19] Fomenko I. K., Pendin V. V., Nguyen C. K. Assessment of damage, danger and risk from landslide processes (on the example of North-West Vietnam) // *Sb. nauch. tr. XIII All-Russian scientific and practical conf. and the exhibition "Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation"*. 2017. P. 27-34 (in Russ.).

[20] Leonova A. V., Strokova L. A., Nikitenkov N. A. Assessment of landslide processes on the territory of Tomsk using GIS technologies // *Bulletin of the Voronezh State University. Ser. «Geologiya»*. 2021. No. 1. P. 94-103 (in Russ.).

[21] Sestraş P., Bilaşco Ş., Roşca S., Naş S., Bondrea M.V., Gălgău R., Vereş I., Sălăgean T., Spalević V., Cîmpeanu S.M. Landslides susceptibility assessment based on GIS statistical bivariate analysis in the hills surrounding a metropolitan area // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, iss. 5. URL: <https://doi.org/10.3390/su11051362>.

[22] Kose D. D., Turk T. GIS-based fully automatic landslide susceptibility analysis by weight-of-evidence and frequency ratio methods // *Physical Geography*. 2019. Vol. 40, iss. 5. P. 481-501. URL: <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1559583>.

[23] Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning // *Engineering Geology*. 2008. Vol. 102, iss. 3. P. 85-98. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>

[24] Van Westen C. J., Van Asch T. W. J., Soeters R. Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? // *Bulletin of engineering geology and the environment*. 2006. Vol. 65, iss. 2. P. 167-184. URL: <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>.

- [25] McColl S. T. Chapter 2. Landslide causes and triggers // *Landslide hazards, risks and disasters* / Eds. J. F. Shroder, T. Davies. Boston: Academic Press, 2015. P. 17-42. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396452-6.00002-1>.
- [26] Tiranti D., Cremonini R. Editorial: landslide hazard in a changing environment // *Frontiers in Earth Science*. 2019. Vol. 7, iss. 3. URL: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00003>.
- [27] Gaidzik K., Ramírez-Herrera M.T. The importance of input data on landslide susceptibility mapping // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, iss. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98830-y>.
- [28] Shannon C. E. Prediction and entropy of printed English // *The Bell System Technical Journal*. 1950. Vol. 30. P. 50-64.

С. А. Тарихазер*¹, С. Г. Мамедов², З. А. Гамидова³

^{1*} Д. ф. д., доцент, бас ғылыми қызметкер (Академик Г. А. Әлиев атындағы География институты, Баку, Әзірбайжан; kerimov17@gmail.com)

² Ф. ф. к. («Азнефть» ӨБ, SOCAR, Баку, Әзірбайжан; seymurmq@gmail.com)

³ География ғылымдарының кандидаты, доцент, аға ғылыми қызметкер (Академик Г. А. Алиев атындағы География институты Баку, Әзірбайжан; zernura@gmail.com)

САҒҒЫ ҚАУІПТІ ӨЗЕН АЛСАСЫНЫҢ КӨШКІККЕ СЕЗІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУДЕГІ САНДЫҚ ӘДІСТІ ҚОЛДАНУ

Аннотация. Мақалада сел қаупі бар өзен бассейніндегі Агсучай қауіпті көшкін процестерін талдау үшін сандық әдіс қолданылады, Шамахи-Исмайыллы аймағындағы туризм мен рекреациялық қызметтің белсенді дамуын ескере отырып. Көшкінге бейімділік пен көшкіннің ықтимал көрінісін анықтау үшін көшкінмен өзара байланысты 9 фактордың «салмағы» анықталды – гипсометрия, еңіс бұрыштары (еңістің тіктігі), еңіс экспозициясы, геологиялық құрылымы (литология), бұзылудан қашықтығы, орташа жылдық жауын-шашын мөлшері, эрозия желілеріне дейінгі қашықтық, жолдарға дейінгі қашықтық және жерді пайдалану. Әрбір көшкіннің түзілу коэффициентін қорытындылау және олардың «салмағы» көбейту арқылы сел қаупі бар өзен бассейнінің Агсучай көшкінге бейімділік картасы жасалды. Алынған үлгілердің сенімділігі AUC ROC (қате қисығы астындағы аудан) талдауы арқылы бағаланды, ол қолданылған әдістің жоғары – 72% тиімділігін көрсетті.

Түйін сөздер: көшкінге бейімділік, сел бассейні, геожүйе, сел қаупі, зақымдану, көшкін қаупі.

S. A. Tarikhazer*¹, S. G. Mammadov², Z. A. Gamidova³

^{1*} Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher (Institute of Geography named after academician G. A. Aliyev, Baku, Azerbaijan; kerimov17@gmail.com)

² Candidate of Geographical Sciences (Azneft Production Association, SOCAR, Baku, Azerbaijan; seymurmq@gmail.com)

³ Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher (Institute of Geography named after academician G. A. Aliyev, Baku, Azerbaijan; zernura@gmail.com)

APPLICATION OF A QUANTITATIVE METHOD IN STUDYING LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY OF THE AGSUCHAY RIVER BASIN

Abstract. The article uses a quantitative method to analyze dangerous landslide processes occurring in the mudflow-prone Agsuchay River basin, taking into account the active development of tourism and recreational activities in the Shamakhi-Ismayilli region. In order to identify landslide susceptibility and the potential manifestation of landslides, the “weight” of 9 factors associated with landslides was determined, including hypsometry, slope angles (slope steepness), slope exposure, geological structure (lithology), distance from faults, average annual precipitation, distance to the erosion networks, distance to roads and land use. By summing up all the landslide formation factors without exception and multiplying them by their “weight”, a map of landslide susceptibility of the mudflow-prone Agsuchay River basin was compiled. The reliability of the obtained models was assessed using the AUC ROC (area under the error curve) analysis, which showed a fairly high efficiency (up to 72 %) of the applied method.

Keywords: landslide susceptibility, mudflow-prone basin, geosystem, mudflow risk, damage, landslide hazard.