ТОО «Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии им.У.Успанова»

Утверждаю
Председатель Правления
ТОО «Казахский НИИ
почвоведения и агрохимии
им.У.Успанова»
_____Р.Х.Рамазанова
«____» _____ 2026 г.

Отчет по оценке природных условий и геодинамических рисков, разработке и научному обоснованию комплексных моделей селевых рисков территории Кок-жайляу для проектирования горного курорта «Almaty Superski»

Алматы, 2026 г.

КОКЖАЙЛАУ. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Казахский научно-исследовательский институт почвоведения и агрохимии имени У.У. Успанова

Цель, содержание и основные направления выполненных исследований

В 2026 году Казахским научно-исследовательским институтом почвоведения и агрохимии имени У.У. Успанова по заказу компании Kazakh Tourism Development Ltd. выполнен комплекс научно-исследовательских работ на территории Кокжайлау. Оценка природных условий проводилась применительно к исходному состоянию территории по состоянию на 2025 год, до начала предполагаемого строительства объектов горной инфраструктуры.

Целью исследований являлись выявление и научная оценка природных опасностей и неблагоприятных факторов климатического, почвенно-экологического и геодинамического характера, а также определение особенностей их пространственного распределения, имеющих значение для планирования развития горной инфраструктуры.

Исследования проводились в рамках двух взаимосвязанных научных направлений. Первое включало оценку современных климатических условий и их возможных изменений, характеристику почвенного покрова, изучение селевых, оползневых, лавинных и эрозионных процессов. Второе было посвящено моделированию селевых процессов, рассмотрению возможных сценариев нарушения устойчивости проектируемых высокогорных водоёмов и оценке потенциальных последствий для нижерасположенных территорий и инфраструктуры. Результаты выполненных работ представлены в четырёх научных отчётах.

Методологическую основу исследований составили анализ многолетних гидрометеорологических наблюдений и архивных материалов, дистанционное зондирование Земли, геоинформационное картографирование, цифровое моделирование рельефа, морфометрический и пространственный анализ, а также сценарное моделирование природных процессов. Для характеристики почвенного покрова использованы архивные почвенно-картографические материалы, сведения о высотной поясности, особенностях рельефа и природных условиях территории. Совокупность применённых методов позволила выявить закономерности распределения природных факторов, охарактеризовать предпосылки развития опасных процессов и определить участки, заслуживающие особого внимания при планировании размещения горной инфраструктуры.

Полученные результаты представлены в виде тематических карт, пространственных оценок, расчётных характеристик и научных рекомендаций, которые могут использоваться при разработке инженерных и природоохранных мероприятий. При этом выполненные исследования имеют научно-аналитический характер и не заменяют специализированные инженерные изыскания, проектные расчёты и предусмотренные законодательством процедуры экологической оценки и экспертизы. Определение технических параметров объектов инфраструктуры и обоснование необходимых защитных решений относятся к задачам последующего проектирования.

В настоящей справке обобщены основные результаты четырёх научных отчётов, систематизированные по тематическим направлениям. Основное внимание уделено выявленным природным опасностям, особенностям их пространственного распределения, возможным последствиям неблагоприятных процессов и практическому

использованию полученных результатов при планировании развития территории Кокжайлау.

1. Климат, снег и условия функционирования горной инфраструктуры

В рамках выполненных исследований проведена комплексная оценка климатических условий территории Кокжайлау, включающая анализ температурного и ветрового режимов, особенностей формирования и сохранения снежного покрова, соотношения жидких и твёрдых атмосферных осадков, повторяемости переходов температуры воздуха через 0 °C и природно-климатических предпосылок применения технологий искусственного оснежения. Информационную основу исследования составили многолетние метеорологические наблюдения станций Каменское плато, Шымбулак, Большое Алматинское озеро и Мынжилки. Для оценки долгосрочных изменений климатических условий рассмотрены сценарии SSP2-4.5 и SSP5-8.5, отражающие различные траектории глобальных климатических изменений. Полученные результаты позволили охарактеризовать пространственную неоднородность климатических условий и определить основные факторы, влияющие на продолжительность и устойчивость зимнего эксплуатационного сезона.

Высотная дифференциация климатических условий

Исследования показали, что климатические условия территории Кокжайлау характеризуются выраженной высотной неоднородностью, проявляющейся в температурном режиме, продолжительности сохранения снежного покрова, соотношении твёрдых и жидких осадков и потенциальной продолжительности периода, благоприятного для функционирования горнолыжной инфраструктуры. В высотном поясе 1800–2200 м установлена повышенная чувствительность условий формирования и сохранения устойчивого снежного покрова к прогнозируемым климатическим изменениям, обусловленная особенностями температурного режима, повторяемостью оттепелей и переходов температуры через 0 °C, а также возможностью выпадения жидких осадков в зимний период. В районе высоты 2600 м выделяется переходная зона с относительно более благоприятными температурно-снеговыми условиями, тогда как в верхних высотных поясах природные предпосылки формирования и сохранения снежного покрова в целом более благоприятны по сравнению с нижерасположенными участками.

Вместе с тем результаты рассмотренных климатических сценариев указывают на тенденцию постепенного сокращения периода сохранения снежного покрова и изменения характеристик зимнего сезона. Выраженность этих процессов зависит от высоты местности, рассматриваемого климатического сценария и локальных природных условий. Выявленные закономерности свидетельствуют о необходимости учитывать климатические особенности каждого высотного пояса при планировании размещения и эксплуатации объектов горной инфраструктуры.

Ветровой режим и распределение снежного покрова

Ветровой режим территории определяется сочетанием региональных атмосферных процессов и местных орографических особенностей. По результатам анализа наблюдений четырёх метеорологических станций средние скорости ветра составляли приблизительно 1,2–1,75 м/с, что характеризует преимущественно слабые и умеренные фоновые ветры. Вместе с тем сложный горный рельеф обусловливает пространственную неоднородность ветрового режима, включая возможность локального усиления воздушных потоков в отдельных долинах, на перегибах склонов и в зонах орографического сужения. Особое значение имеет ветровое перераспределение

снежных масс, способное формировать участки повышенного снегонакопления и зоны с относительно меньшей мощностью снежного покрова, что влияет на распределение снежных ресурсов и условия формирования потенциально лавиноопасных участков.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учитывать местные особенности ветрового и снегового режимов при выборе трасс, размещении подъёмников и других объектов инфраструктуры. Для последующего инженерного проектирования рекомендуется уточнение характеристик локального ветрового режима, включая возможные усиления ветра, а также особенностей накопления и перераспределения снега на конкретных участках.

Климатические изменения и условия формирования снежного покрова

Сопоставление температурных характеристик, доли твёрдых зимних осадков, повторяемости циклов замерзания и оттаивания, а также количества дней с условиями, потенциально пригодными для искусственного оснежения, позволило оценить климатическую чувствительность отдельных высотных поясов. Полученные результаты имеют практическое значение для определения продолжительности возможного горнолыжного сезона, оценки перспектив применения искусственного оснежения и учёта прогнозируемых климатических изменений при планировании эксплуатации горной инфраструктуры.

Оценка перспектив функционирования горнолыжной инфраструктуры должна основываться не только на средних зимних температурах и общем количестве осадков, но и на комплексном анализе продолжительности снежного сезона, устойчивости снежного покрова, соотношения жидких и твёрдых осадков, особенностей ветрового переноса снега и повторяемости температурных условий, благоприятных для эксплуатации инфраструктуры.

Возможности применения искусственного оснежения

Искусственное оснежение может рассматриваться как один из технологических инструментов повышения устойчивости функционирования горнолыжной инфраструктуры в условиях климатической изменчивости. Возможности его применения определяются сочетанием температурных условий, доступности водных ресурсов, энергетического обеспечения, технических характеристик оборудования и особенностей размещения инженерных систем. При этом эффективность искусственного оснежения зависит от природно-климатических условий отдельных высотных участков и не может оцениваться одинаково для всей территории.

Выполненное исследование позволило охарактеризовать климатические предпосылки использования подобных технологий, однако полученные результаты сами по себе не определяют техническую, экономическую и экологическую эффективность конкретной системы искусственного оснежения. Для обоснования соответствующих проектных решений необходимы специализированные расчёты, включающие оценку водообеспечения, технологических параметров оборудования, энергопотребления, потенциального воздействия на водосборы и соответствия проектируемых систем установленным природоохранным требованиям.

Практическое значение результатов исследования

Основным практическим результатом климатического блока является выявление высотных и пространственных различий природно-климатических условий, имеющих значение для планирования размещения и эксплуатации объектов горной инфраструктуры. Полученные материалы позволяют учитывать особенности температурно-снегового режима, ветрового перераспределения снега и прогнозируемой динамики климатических показателей при выборе потенциальных участков размещения трасс, подъёмников и сопутствующих сооружений. Особое значение имеет учёт

долгосрочных климатических изменений на стадиях территориального планирования, инженерного проектирования и последующей эксплуатации объектов.

Представленные результаты характеризуют природно-климатические предпосылки и возможные направления изменения условий функционирования горной инфраструктуры, но не являются самостоятельной комплексной оценкой технической осуществимости или экономической эффективности развития горнолыжного кластера. Окончательная оценка эксплуатационной пригодности отдельных участков должна выполняться с учётом конкретных технических параметров инфраструктуры, возможностей искусственного оснежения, условий водообеспечения, экологических требований и результатов специализированных инженерных исследований.

Выводы и рекомендации по климату

Климатические исследования позволили установить существенные различия условий формирования и сохранения снежного покрова в зависимости от высотного положения территории Кокжайлау, а также оценить возможные изменения этих условий в перспективе. Полученные результаты позволяют учитывать климатическую устойчивость отдельных высотных поясов при выборе участков размещения горнолыжной инфраструктуры и определении условий её долгосрочной эксплуатации.

При проектировании горной инфраструктуры рекомендуется использовать результаты климатического анализа для выбора мест размещения объектов и обоснования условий их долгосрочной эксплуатации. На участках предполагаемого строительства целесообразно предусматривать уточняющие метеорологические и снегомерные наблюдения. Проектирование систем искусственного оснежения должно учитывать местные температурные условия, обеспеченность водными и энергетическими ресурсами, технические характеристики оборудования и природоохранные требования. Особое внимание следует уделять возможности адаптации инженерных и эксплуатационных решений к прогнозируемым климатическим изменениям.

2. Почвенный покров. Состояние, ограничения и меры сохранения

Особенности почвенного покрова и его современное состояние

Почвенный покров территории Кокжайлау представлен преимущественно горно-лесными, горно-луговыми и высокогорными почвами, пространственное распределение которых определяется высотной поясностью, экспозицией и крутизной склонов, особенностями почвообразующих пород и условиями увлажнения. Для территории характерны выраженная мозаичность почвенных контуров, неоднородность мощности почвенного профиля, значительная каменистость отдельных участков и различия водного режима. В природных условиях почвенный покров выполняет важные экологические функции, обеспечивая развитие растительности, регулирование поверхностного стока, сохранение влаги и поддержание противоэрозионной устойчивости склонов.

По результатам выполненной почвенно-геоэкологической оценки общее состояние почвенного покрова территории Кокжайлау характеризуется как удовлетворительное. Вместе с тем на отдельных участках отмечаются проявления существующего рекреационного воздействия, включая локальное уплотнение почв, развитие тропиночной сети и отдельные признаки поверхностной эрозии. Природная чувствительность горных почв к механическим нарушениям обусловлена прежде всего особенностями их строения, мощностью гумусового горизонта, каменистостью и условиями поверхностного увлажнения. На многих участках мощность дерново-

гумусового горизонта составляет приблизительно 15–30 см, тогда как на наиболее крутых и расчленённых склонах она может быть существенно меньше.

Пространственная неоднородность и особенности эрозионных процессов

Наиболее чувствительными к нарушению почвенно-растительного покрова являются крутые склоны, бровки и перегибы рельефа, борта эрозионных ложбин, прируслovые участки и зоны концентрации поверхностного стока. На таких территориях механическое воздействие, изменение естественного дренажа и нарушение растительности могут способствовать усилению поверхностного смыва, формированию промоин и изменению локальных условий увлажнения. Относительно более благоприятные условия для размещения отдельных элементов инфраструктуры характерны для пологих участков рельефа, расположенных вне зон активного стока и проявления склоновой неустойчивости, при условии подтверждения их пригодности последующими специализированными обследованиями.

Особое значение имеет взаимосвязь состояния почвенного покрова с гидрологическими и геодинамическими процессами. Дерново-гумусовый горизонт и естественная растительность способствуют регулированию поверхностного стока и закреплению склоновых отложений. При нарушении растительного покрова возможно изменение условий инфильтрации, увеличение поверхностного смыва и поступления мелкозёма в склоновые ложбины и водотоки. В связи с этим сохранение почвенного покрова следует рассматривать как составную часть комплексных мероприятий по регулированию стока, предупреждению эрозионных процессов и обеспечению устойчивости склонов.

Исследования выявили существенные различия в мощности почвенного профиля, каменистости, условиях увлажнения и чувствительности горных почв к эрозионным воздействиям. На водораздельных и выпуклых элементах рельефа встречаются участки с ограниченным содержанием мелкозёма, тогда как в склоновых ложбинах происходит его накопление, нередко сопровождающееся повышенным увлажнением. Особое значение имеют сравнительно продолжительные сроки естественного восстановления нарушенных горных почв, которые в отдельных условиях могут составлять десятки лет. Эти особенности необходимо учитывать при выборе способов инженерной подготовки территории, организации строительных работ и разработке мероприятий по сохранению и восстановлению почвенного покрова.

Возможности сохранения и восстановления почвенного покрова

Результаты почвенно-геоэкологической оценки показывают, что при планировании размещения объектов инфраструктуры необходимо учитывать пространственные различия почвенных условий и их взаимосвязь с рельефом и поверхностным стоком. На участках с маломощными щебнистыми почвами рекомендуется ограничивать площадь и глубину земляных работ. В зонах концентрации стока и выраженной склоновой неустойчивости следует в первую очередь рассматривать альтернативные варианты размещения объектов. Возможность проведения работ и необходимость специальных инженерных решений должны определяться по результатам обследований и расчётов. Необходимо сохранять естественный дерновый покров вне рабочих площадок, предотвращать нарушение естественного дренажа и неорганизованный сброс воды на склоны.

При выполнении земляных работ рекомендуется предусматривать раздельное снятие и сохранение пригодного для восстановления почвенного материала без смешивания с нижележащими породами и строительными отходами. Глубину снятия следует определять по фактической мощности и свойствам горизонтов на каждом участке. Места хранения, объёмы, способы защиты от смыва, загрязнения и уплотнения,

сроки и направления повторного использования необходимо устанавливать проектом. Площадки хранения следует размещать вне русел и путей концентрированного стока, исключая дополнительное нагружение неустойчивых склонов. Восстановление целесообразно выполнять поэтапно, по мере завершения работ, возвращая сохранённый материал на подготовленную устойчивую поверхность после организации водоотведения.

Вместе с тем необходимо учитывать, что возможности восстановления горных почв зависят от степени их первоначального нарушения, характера почвообразующих пород, высотного положения, увлажнения и особенностей растительного покрова. Применение рекультивационных мероприятий способствует восстановлению нарушенных участков, однако не во всех случаях обеспечивает быстрое воспроизведение исходных природных характеристик почв. Поэтому при выборе проектных решений приоритетное значение имеет предупреждение необоснованного нарушения естественного почвенного покрова.

Практическое значение результатов исследования

Проведённая почвенно-геоэкологическая оценка позволила установить закономерности пространственного распределения почвенного покрова территории Кокжайлау и выявить участки, различающиеся по степени чувствительности к возможным антропогенным воздействиям. Полученные материалы представляют практический интерес для проектных организаций, поскольку позволяют учитывать особенности почвенных условий при размещении объектов инфраструктуры и определении необходимых природоохранных мероприятий.

Почвенно-геоэкологическая оценка территории Кокжайлау выполнена преимущественно на основе архивных почвенно-картографических материалов и анализа природных условий, без проведения сплошного нового полевого обследования с закладкой почвенных разрезов. Полученные результаты характеризуют общие закономерности распределения и состояния почвенного покрова. При разработке проектной документации профильным специалистам необходимо уточнять характеристики почв непосредственно на участках предполагаемого строительства, включая мощность почвенных горизонтов, гранулометрический состав, каменистость, условия увлажнения и границы почвенных контуров.

Выводы и рекомендации по почвенному покрову

Результаты почвенных исследований свидетельствуют об общем удовлетворительном состоянии почвенного покрова территории Кокжайлау при существенных различиях его природных характеристик. Наиболее чувствительными к возможным антропогенным воздействиям являются участки с маломощными щебнистыми почвами, крутые и расчленённые склоны, а также зоны концентрации поверхностного стока.

При планировании развития горной инфраструктуры рекомендуется максимально сохранять естественную растительность и ограничивать земляные работы установленными границами необходимых строительных площадок. До начала работ следует предусмотреть согласованный комплекс мер по сохранению почв, поверхностному водоотведению, противоэрозионной защите, поэтапному восстановлению и мониторингу. Точные границы ограничений необходимо уточнять при совмещении тематических карт исследования с планом размещения объектов и результатами обследований. Подрезка склонов, устройство насыпей и изменение дренажа требуют обоснования устойчивости. При отсутствии достаточного обоснования сохранности почвенного покрова и устойчивости склонов необходимо

рассмотреть альтернативные варианты размещения объектов или выполнения соответствующих работ.

При организации работ также рекомендуется:

- ограничивать площадь одновременного снятия покрова и восстанавливать участки последовательно, по мере завершения работ;
- сохранять естественную растительность за границами необходимых строительных площадок;
- предусматривать расчётное водоотведение, исключающее неорганизованный сброс воды на незащищённые склоны и перенос размыва на нижерасположенные участки;
- временно защищать оголённые поверхности мульчей или закреплёнными биоразлагаемыми противоэрозионными покрытиями;
- после подготовки поверхности восстанавливать растительность местным посадочным или семенным материалом.

Для восстановления нарушенных горных участков рекомендуется рассматривать сохранение и обратную укладку местного почвенного слоя, пересадку сохранённой дернины, посев местных видов растений, перенос семеносной растительной массы, гидропосев и применение биоразлагаемых противоэрозионных покрытий. Дернину предпочтительно сохранять из зоны неизбежного нарушения; её временное содержание должно обеспечивать жизнеспособность растений. Семенной материал следует подбирать в соответствии с высотным поясом и условиями участка, а заготовку семеносной массы проводить без ухудшения состояния донорского сообщества. Гидропосев предусматривает нанесение смеси семян, волокнистой мульчи и закрепляющего компонента. Противоэрозионные покрытия требуют подбора по крутизне склона и условиям стока, контакта с почвой и надёжного крепления. На отдельных участках возможно применение почвенной биоинженерии, сочетающей подходящие местные растения и удерживающие конструкции, при инженерном обосновании.

Для Кокжайлау выбор и сочетание этих методов должны учитывать высоту, крутизну и экспозицию склонов, мощность почв, условия увлажнения и характер повреждения. Конкретные решения рекомендуется разрабатывать совместно почвоведам, ботаникам, гидрологам и инженерам. До широкого применения целесообразно проверить методы на опытных участках. Мониторинг должен включать оценку растительного покрытия и видового состава, сохранности почвенного слоя, признаков смыва и состояния водоотведения в сравнении с исходным состоянием и ненарушенными участками в сходных условиях. Наблюдения следует проводить в течение нескольких вегетационных сезонов, включая снеготаяние и последствия сильных дождей. Критерии приёмки, сроки контроля и корректирующие меры необходимо устанавливать в программе восстановления.

Указанные технологии могут снижать поверхностный размыв и содействовать восстановлению растительности, однако не гарантируют быстрого и полного возвращения исходных свойств горных почв. Появление растительного покрытия не равнозначно восстановлению почвенного профиля и его экологических функций. Посев, пересадка дернины и противоэрозионные покрытия не заменяют инженерных решений при глубокой неустойчивости склонов. Приоритетом остаётся сохранение естественного покрова за счёт минимизации площади нарушений.

3. Геодинамическая обстановка и развитие опасных природных процессов

3.1. Общая характеристика геодинамической обстановки и методы исследования

Территория Кокжайлау расположена в горной части Иле Алатау и характеризуется сложным строением рельефа, значительными высотными различиями, неоднородностью геологических и гидрологических условий, а также разнообразием современных и унаследованных геодинамических процессов. Особенности морфологического строения склонов, распределения поверхностного стока, состояния почвенно-растительного покрова и климатических условий определяют пространственные различия в предпосылках формирования оползневых, лавинных, эрозионных и селевых процессов. При этом характер их проявления существенно изменяется в зависимости от положения участка в пределах склоново-водосборной системы, крутизны и экспозиции склонов, особенностей геологического строения и условий увлажнения.

В рамках выполненных исследований проведён комплексный пространственный анализ геодинамических условий территории, включающий морфометрическую характеристику рельефа, оценку его расчленённости и энергии, моделирование оползневой восприимчивости склонов, изучение потенциальной лавинной опасности, оценку эрозионной активности и инвентаризацию участков, характеризующихся предпосылками формирования селевых процессов. Дополнительно выполнено интегральное геодинамическое районирование, направленное на выявление пространственных сочетаний природных факторов, определяющих особенности развития опасных склоновых и русловых процессов.

Методологическую основу исследования составили геоинформационный и пространственный анализ, цифровое моделирование рельефа, обработка тематических картографических материалов и оценка морфометрических, гидрологических и природно-ландшафтных характеристик территории. В качестве основного источника высотной информации использована цифровая модель рельефа Copernicus DEM, на основе которой определялись уклоны и экспозиции склонов, особенности пространственной расчленённости, характеристики водосборов и другие параметры, необходимые для моделирования геодинамических процессов. Для отдельных расчётных задач использовались различные пространственные масштабы анализа, что позволило рассмотреть как локальные особенности склонов, так и общие закономерности морфологического строения горной территории.

Проведённый пространственный анализ позволил установить особенности сочетания природных факторов, определяющих предпосылки развития геодинамических процессов в различных частях территории Кокжайлау. Разработанные материалы дают возможность выявлять участки, на которых сочетание морфометрических, геологических и гидрологических условий требует особого внимания при размещении объектов горной инфраструктуры.

При интерпретации результатов необходимо учитывать различия между характеристиками рельефа, расчётной восприимчивостью территории к развитию отдельных процессов и фактически наблюдаемой геодинамической активностью. Морфометрические показатели отражают особенности строения поверхности, тогда как модели оползневой, лавинной и эрозионной опасности характеризуют пространственное распределение природных предпосылок развития соответствующих процессов. Наличие таких предпосылок само по себе не означает обязательного возникновения опасного события на конкретном участке. Аналогичным образом выявление древних оползневых форм свидетельствует о предшествующих склоновых деформациях, но не является достаточным основанием для заключения об их современной активности.

Разработанные тематические карты и результаты интегрального геодинамического районирования имеют различное методическое назначение и в отдельных случаях отличаются пространственными границами расчётов. В связи с этим площади и доли выделенных классов следует рассматривать применительно к соответствующим моделям, не объединяя их в единый показатель опасности или риска. Практическая ценность пространственного анализа заключается в возможности сопоставления различных природных факторов, выявления участков их совместного проявления и определения приоритетных направлений последующих инженерных исследований.

Результатом комплексного геодинамического анализа стало выявление пространственных закономерностей распределения природных предпосылок развития оползневых, лавинных, эрозионных и селевых процессов на территории Кокжайлау. Разработанные тематические карты и материалы моделирования позволяют сопоставлять особенности геодинамической обстановки отдельных участков и учитывать их при выборе мест размещения объектов горной инфраструктуры.

3.2. Морфометрические особенности рельефа и пространственное распределение его энергии

Одним из направлений геодинамических исследований территории Кокжайлау стал анализ энергии рельефа, характеризующей особенности его высотной расчленённости. Использование этого показателя позволило оценить пространственные различия морфометрических условий и выделить участки с различной выраженностью природных предпосылок развития склоновых и эрозионных процессов.

Исследование проведено на основе цифровой модели рельефа с размером расчётной ячейки 23,92 м с использованием двух пространственных масштабов, соответствующих радиусам анализируемого окна 100 м (σ100) и 1000 м (σ1000). Применение двух масштабов позволило охарактеризовать как общие закономерности расчленённости горной территории, так и локальные особенности строения склонов, имеющие значение при предварительном планировании размещения инфраструктуры.

Региональный показатель σ1000 отражает общую морфометрическую структуру горного рельефа и характеризует значительные относительные высотные различия, свойственные территории Иле Алатау. По результатам расчётов высокий класс энергии рельефа занимает 76,67% площади соответствующей модели, экстремальный 3,71%, умеренный 19,62%. Указанное распределение отражает прежде всего региональные особенности горной местности и не является непосредственной характеристикой геодинамической опасности отдельных участков предполагаемого размещения инфраструктуры.

Для оценки локальных морфометрических условий территории Кокжайлау более непосредственное практическое значение имеет показатель σ100, позволяющий детализировать особенности строения склонов на меньшем пространственном масштабе. По результатам расчётов низкий и умеренный классы энергии рельефа суммарно занимают 99,67% площади соответствующей модели, что свидетельствует о преобладании относительно небольших локальных высотных контрастов в пределах анализируемых расчётных окон. При этом отдельные участки с выраженными морфологическими особенностями требуют дополнительного рассмотрения с учётом геологических, гидрологических и других природных факторов.

Сопоставление показателей энергии рельефа на региональном и локальном уровнях позволило установить различия в характере высотной расчленённости территории Кокжайлау. При этом локальные морфометрические характеристики имеют более непосредственное значение для оценки условий размещения горной

инфраструктуры. Поскольку энергия рельефа отражает лишь одну из природных предпосылок развития геодинамических процессов, результаты её оценки следует рассматривать совместно с данными об оползневой восприимчивости склонов, эрозионной активности, геологических и гидрологических условиях территории.

Полученные результаты характеризуют морфометрические особенности рельефа территории Кокжайлау и могут использоваться специалистами инженерно-геологического и проектного профиля при выборе участков размещения инфраструктуры, оценке местных условий строительства и разработке соответствующих технических решений.

3.3. Оползневые процессы и пространственная восприимчивость склонов

В рамках геодинамических исследований территории Кокжайлау выполнена пространственная оценка оползневой восприимчивости склонов на основе геоинформационного моделирования с учётом геологических, морфометрических и гидрологических характеристик. Основной задачей анализа являлось определение закономерностей территориального распределения природных предпосылок развития оползневых процессов и выделение участков, которые необходимо учитывать при планировании размещения горной инфраструктуры.

По результатам моделирования установлена выраженная пространственная неоднородность оползневой восприимчивости территории Кокжайлау. В пределах соответствующего картографического охвата участки с наиболее выраженными природными предпосылками развития оползневых процессов занимают около 70,3 км². Эти показатели характеризуют расчётную восприимчивость склонов, но не свидетельствуют об их современной активности и не определяют вероятность возникновения оползней в конкретный период. Разработанные материалы позволяют учитывать пространственное распределение оползневой восприимчивости при выборе участков размещения горной инфраструктуры.

Важным результатом исследований стала инвентаризация 43 палеооползневых тел общей площадью около 646,04 га, или 6,46 км². Наиболее крупные образования сосредоточены в бассейне реки Терісбұтақ, где два крупнейших оползневых комплекса занимают около 387,65 га, что составляет приблизительно 60% площади всех выявленных древних оползневых тел. В бассейне Батарейки выделено 18 сравнительно небольших образований. Такое распределение отражает особенности исторического развития склоновых процессов и различия геоморфологических условий отдельных частей территории Кокжайлау.

Формирование древних оползневых тел следует рассматривать в контексте длительной геодинамической эволюции Иле Алатау, включая воздействие сильных исторических землетрясений. Крупные сейсмические события конца XIX и начала XX века сопровождались многочисленными склоновыми деформациями в различных частях горной системы. Поэтому сейсмическое воздействие может рассматриваться как один из возможных факторов формирования выявленных палеооползневых образований. Вместе с тем возраст конкретных оползневых тел и их связь с отдельными историческими землетрясениями в рамках выполненного исследования специально не устанавливались.

В процессе длительного природного развития древние оползневые образования могут приобретать относительно устойчивое состояние вследствие перераспределения склоновых масс, изменения условий дренирования и постепенного формирования растительного покрова. В отдельных случаях реализация крупных склоновых смещений в прошлом могла сопровождаться уменьшением объёма потенциально неустойчивого материала. Однако количественная оценка изменения оползневого потенциала

территории Кокжайлау не проводилась. Следовательно, наличие древних оползневых форм не свидетельствует об их обязательной современной активности, но и не исключает возможности повторных деформаций при изменении природных условий или дополнительном антропогенном воздействии.

К основным факторам возможной активизации оползневых процессов относятся дополнительное увлажнение склонов, изменение режима поверхностных и подземных вод, эрозионная подрезка оснований склонов, нарушение естественного дренажа, увеличение нагрузок и сейсмические воздействия. Особого внимания при размещении объектов горной инфраструктуры требуют участки древних оползневых образований, крутые борта долин, зоны сопряжения склонов с водотоками и территории предполагаемого проведения значительных земляных работ. При проектировании сооружений на таких участках необходимо предусматривать оценку устойчивости склонов с учётом конкретных инженерно-геологических и гидрогеологических условий.

При разработке проектных решений для участков с повышенной оползневой восприимчивостью рекомендуется сопоставлять варианты размещения объектов и необходимость инженерной защиты. По результатам инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий могут рассматриваться регулирование поверхностного и подземного стока, укрепление склонов и откосов, ограничение подрезки и дополнительного нагружения, инструментальный мониторинг деформаций. Выбор сооружений, их параметры и эффективность должны подтверждаться расчётами устойчивости с учётом строительных и эксплуатационных воздействий. Мониторинг дополняет защитные мероприятия, но не заменяет обоснования безопасности проектных решений.

3.4. Лавинные процессы и особенности пространственного распределения лавинной опасности

Лавинные процессы относятся к числу наиболее изученных опасных природных явлений в горных районах Иле Алатау. На территории Кокжайлау ранее проводились специализированные исследования лавинной опасности, в том числе с участием европейских специалистов, применявших методы математического моделирования и пространственного анализа. Наличие ранее выполненных работ и накопленных материалов позволило не только провести самостоятельную оценку лавинной обстановки, но и сопоставить полученные результаты с существующими исследованиями.

В рамках выполненной работы проведено пространственное моделирование потенциальной лавинной опасности территории Кокжайлау с использованием цифровой модели рельефа, морфометрических характеристик склонов и природно-климатических факторов, определяющих условия формирования и движения снежных масс. Проанализированы крутизна и экспозиция склонов, локальные перепады высот, особенности распределения снежного покрова, ветрового переноса снега и морфологическое строение склоново-долинных систем. Полученные результаты позволили выявить и картографировать участки с различными предпосылками развития лавинных процессов, определить потенциальные очаги лавинообразования и основные направления возможного движения снежных масс.

Одним из важных результатов исследования стало выделение лавинных лотков и коридоров, по которым при соответствующих снегопогодных условиях возможно перемещение снежных масс. Для этих участков проанализированы особенности рельефа, построены продольные профили и определены пространственные связи между зонами возможного зарождения лавин, участками их транзита и аккумуляции. Выявленные закономерности позволили уточнить характер пространственного

распределения потенциальной лавинной опасности и выделить участки, которым необходимо уделять первоочередное внимание при последующем планировании размещения горнолыжных трасс, канатных дорог и других объектов инфраструктуры.

Существенное значение имеет сопоставление результатов проведённого моделирования с ранее выполненными исследованиями европейских специалистов. По предварительной оценке исследовательского коллектива, пространственное совпадение выделенных лавинных участков и направлений возможного движения снежных масс с результатами зарубежных исследований составляет порядка 70–80%. Такое соответствие свидетельствует о согласованности основных пространственных закономерностей, выявленных независимо применёнными подходами. Вместе с тем окончательная количественная интерпретация степени совпадения требует уточнения методики сопоставления, границ анализируемых территорий и используемых критериев оценки.

Результаты исследования показывают, что потенциальная лавинная опасность имеет выраженную пространственную приуроченность к определённым морфологическим элементам рельефа. Формирование лавин связано с сочетанием крутизны и экспозиции склонов, условий накопления снежного покрова, ветрового перераспределения снега и изменений температурного режима. При этом потенциальные лавинные очаги и коридоры не характеризуют постоянную активность лавинных процессов, поскольку возможность их возникновения существенно зависит от конкретных метеорологических условий и состояния снежной толщи. Выделение таких участков позволяет учитывать особенности природной обстановки при выборе мест размещения инфраструктуры и определении необходимых защитных мероприятий.

Разработанные карты потенциальной лавинной опасности рекомендуется использовать для предварительного сопоставления вариантов размещения инфраструктуры и определения участков, требующих специализированных изысканий. В зависимости от уточнённых условий следует рассматривать перенос объектов за пределы зон воздействия, противолавинные инженерные сооружения и систему наблюдений с регламентом ограничения доступа. Конкретные решения и параметры защитных сооружений должны определяться профильными специалистами на основании уточнённых расчётов движения лавин и условий эксплуатации инфраструктуры.

Современные методы лавинного прогнозирования, математического моделирования и инженерной защиты позволяют существенно снижать риски для людей и инфраструктуры. Особое значение имеет организация системы наблюдений за температурным режимом, интенсивностью снегопадов, состоянием снежного покрова и ветровым переносом снега. Совместное использование результатов пространственного моделирования, оперативного мониторинга и специальных противолавинных мероприятий позволяет своевременно выявлять неблагоприятные условия, ограничивать доступ к потенциально опасным участкам и принимать необходимые меры по предупреждению воздействия лавин. Эффективность такой системы зависит от полноты наблюдений, обоснованности проектных решений и соблюдения установленных эксплуатационных требований.

3.5. Водная эрозия и склоново-русловые процессы

В рамках геодинамических исследований территории Кокжайлау выполнена пространственная оценка предпосылок развития водной эрозии с использованием геоинформационного моделирования. При анализе учитывались морфометрические характеристики рельефа, экспозиция склонов, состояние растительного покрова, особенности снежного режима и близость к водотокам. Полученные результаты

позволили выявить закономерности территориального распределения потенциальной эрозионной активности и определить участки, наиболее чувствительные к возможному усилению эрозионных процессов при изменении природных условий или антропогенном воздействии.

По результатам пространственного моделирования установлено, что участки, отнесённые к двум начальным классам нормированного показателя эрозионной активности, занимают 23,81 км², или 88,48% расчётной площади. В принятой классификации они обозначены как фоновая и локальная эрозионная активность. Участки умеренного класса занимают 1,53 км² (5,68%), повышенного и интенсивного классов суммарно около 1,57 км² (5,83%). Полученные показатели характеризуют пространственное распределение расчётных предпосылок развития эрозионных процессов и не являются непосредственным измерением интенсивности фактического смыва почв.

Одним из основных результатов исследования стало выделение 71 потенциального участка развития эрозионных форм общей площадью около 2,64 км². Указанные участки определены на основе пространственного моделирования и характеризуют территории, где сочетание морфометрических, гидрологических и ландшафтных факторов может создавать условия для формирования или дальнейшего развития эрозионных процессов. При этом выделенные полигоны не следует рассматривать как территории, полностью охваченные активной эрозией. Полученные результаты позволяют определить участки, заслуживающие дополнительного внимания при последующих инженерных и природоохранных обследованиях.

Развитие эрозионных процессов на территории Кокжайлау связано прежде всего с особенностями формирования и концентрации поверхностного стока, крутизной склонов и состоянием почвенно-растительного покрова. На отдельных участках изменение естественного водоотведения, нарушение дернового слоя и проведение земляных работ могут способствовать усилению поверхностного смыва, формированию промоин и поступлению рыхлого материала в склоновые ложбины и русловую сеть. Степень проявления указанных процессов зависит от местных природных условий и характера инженерного воздействия, что необходимо учитывать при планировании освоения территории.

Результаты эрозионного моделирования рекомендуется использовать при размещении инфраструктуры и разработке системы водоотведения. На участках с повышенной эрозионной восприимчивостью необходимо предусматривать безопасный перехват и отвод дождевых и талых вод, защиту мест их выпуска от размыва и предотвращение концентрации стока на незащищённых склонах. Выбор водоотводных и водопропускных сооружений и их пропускную способность следует обосновывать гидрологическими и гидравлическими расчётами с учётом наносов и возможного засорения. Для временной защиты нарушенных поверхностей могут применяться мульчирование и закреплённые биоразлагаемые покрытия в сочетании с восстановлением местной растительности. Конкретные мероприятия должны учитывать рельеф, свойства грунтов и технологию строительства, не создавая дополнительного размыва ниже по склону.

3.6. Селевые процессы, пространственное распределение селевой опасности и сценарные оценки

Исследование селевых процессов на территории Кокжайлау и прилегающих водосборов включало инвентаризацию потенциально селеопасных участков, анализ исторических событий, изучение морфологических особенностей русловой сети и сценарное моделирование селевых потоков. Основное внимание уделено бассейнам рек

Терісбұтақ, Казачка, Беделбай и Батарейка, различающимся площадью водосборов, крутизной склонов, характером русловых отложений и условиями формирования поверхностного стока.

Одним из основных результатов исследования стало выделение 40 участков с природными предпосылками развития селевых процессов общей площадью около 14,4 км². Их пространственное распределение характеризуется выраженной неоднородностью. В восточном и юго-восточном секторах, охватывающих Куйгенсай и прилегающие правобережные склоны, выделено 13 участков общей площадью 7,13 км², из которых 9 отнесены в исходной инвентаризации к категории активных. В западном и центральном секторах, включающих бассейн Терісбұтақ и территорию Кокжайлау, определены 14 потенциальных участков площадью 6,02 км², а в северном секторе, охватывающем Батарейку и прилегающие склоны, 13 участков площадью 1,25 км². Пять наиболее крупных полигонов занимают около 7,80 км², или 54,2% суммарной площади выделенных участков. Полученные показатели характеризуют пространственные результаты инвентаризации и не означают одновременного проявления селевой активности на всей площади соответствующих полигонов.

Ретроспективный анализ позволил систематизировать сведения о селевых событиях, происходивших в различных частях Иле Алатау, включая бассейны исследуемой территории. В частности, рассмотрены сель в бассейне Терісбұтақ в 1969 году с приведённым расходом 39,4 м³/с, событие в бассейне Беделбая 14 июля 1999 года с оценочным максимальным расходом около 200 м³/с, а также отдельные события 2023 и 2026 годов. Анализ исторических материалов показывает, что формирование селевых потоков определяется не только общим количеством атмосферных осадков, но и интенсивностью локальных ливней, предшествующим увлажнением водосборов, состоянием склонов и русел, а также наличием рыхлого материала, доступного для перемещения водными потоками. Эти особенности необходимо учитывать при оценке условий возможного развития селевых процессов.

Проведённое исследование подтвердило существенные различия морфометрических и гидрологических характеристик рассматриваемых водосборов. Площадь бассейна Терісбұтақ составляет около 32,3 км² при длине основного водотока приблизительно 11 км, бассейна Казачки около 15 км², Беделбая 5,93 км² и Батарейки 5,55 км². Различия площади водосборов, крутизны склонов, характера русловой сети и объёмов доступного рыхлого материала определяют неодинаковую реакцию отдельных бассейнов на интенсивные атмосферные осадки. Поэтому оценка селевых процессов должна учитывать природные особенности каждого водосбора, а не основываться на единых характеристиках для всей исследуемой территории.

В рамках сценарного анализа рассмотрены возможные параметры формирования и движения селевых потоков при различных гидрометеорологических условиях. Для бассейна Терісбұтақ в использованных расчётных материалах при обеспеченности 1% приведены ориентировочные расходы наносоводного потока около 38 м³/с и грязекаменного потока около 420 м³/с в устьевом створе. Для притока Казачка расчётный расход соответствующего селевого потока составляет около 290 м³/с. Указанные величины относятся к определённым расчётным схемам, типам потоков и створам и не характеризуют фактически наблюдаемую современную селевую активность или неизбежность реализации рассматриваемых сценариев. Их назначение заключается в оценке возможных параметров природных процессов, необходимых для последующих инженерных расчётов и обоснования защитных мероприятий.

Особое внимание в исследовании уделено возможному развитию селевых процессов в пределах единой склоново-русловой системы. Формирование поверхностного стока, вовлечение рыхлого материала, движение потока по русловой

сети и последующая аккумуляция наносов представляют собой взаимосвязанные этапы, параметры которых определяются особенностями конкретного водосбора. На характер движения потока могут влиять русловая эрозия, склоновые смещения, временные завалы и изменения пропускной способности отдельных участков русел. При планировании инфраструктуры необходимо учитывать возможное воздействие земляных работ, изменения естественного водоотведения и размещения водопропускных сооружений на условия концентрации стока и перемещения наносов.

Практическое значение выполненных исследований заключается в формировании пространственной и расчётной основы для предварительной оценки условий размещения горной инфраструктуры и определения необходимых противоселевых мероприятий. Разработанные материалы позволяют учитывать расположение потенциальных селевых очагов, направления движения потоков и особенности их возможного взаимодействия с дорогами, мостами, водопропускными сооружениями и другими объектами. Важное значение имеют сохранение естественного режима водосборов, регулирование поверхностного стока, предупреждение образования искусственных очагов концентрации рыхлого материала и обеспечение необходимой пропускной способности русловых сооружений. В материалах исследования сформирован перечень из **31 первоочередного организационного и инженерного мероприятия**, направленного на предупреждение и снижение селевых и сопряжённых природных рисков.

Рекомендации по предупреждению и снижению селевой опасности

По результатам исследований для бассейна реки Терісбұтақ предложен комплекс организационных и инженерных мероприятий, предусматривающий сохранение естественных условий формирования стока, предупреждение возникновения дополнительных селеформирующих участков, противоэрозионную защиту склонов и регулирование поверхностного водоотведения.

Особое внимание рекомендуется уделить состоянию русловой сети, мостовых переходов и водопропускных сооружений, включая оценку их пропускной способности с учётом возможного переноса наносов, крупнообломочного материала и древесины. В зависимости от результатов расчётов могут рассматриваться селезадерживающие и руслорегулирующие сооружения, а также другие инженерные меры защиты.

Важным направлением является организация комплексного мониторинга гидрометеорологических условий, состояния водотоков и устойчивости склонов с использованием систем раннего предупреждения. Конкретный состав, размещение и параметры предлагаемых мероприятий определяются на последующих этапах инженерного обоснования с учётом особенностей каждого водосбора.

3.7. Комплексное геодинамическое районирование территории

Завершающим этапом исследования геодинамических условий Кокжайлау стало комплексное районирование территории на основе совместного анализа морфометрических, геологических, гидрологических, климатических и других природных факторов. Основной задачей районирования являлось обобщение результатов тематического моделирования оползневых, лавинных, эрозионных и селевых процессов, выявление пространственных различий геодинамических условий и определение участков, требующих дополнительного внимания при планировании размещения горной инфраструктуры.

По результатам комплексного геодинамического районирования установлено, что участки с умеренной выраженностью природных предпосылок развития геодинамических процессов занимают 40,78% площади соответствующей расчётной модели. Ещё 39,83% приходятся на территории с более выраженным сочетанием

природных факторов, создающих потенциальные предпосылки для развития склоновых и русловых процессов. Указанные особенности необходимо учитывать при размещении объектов инфраструктуры и разработке соответствующих инженерно-защитных мероприятий. При этом результаты районирования характеризуют пространственное распределение природных предпосылок и не являются непосредственной оценкой современной активности геодинамических процессов.

Следует учитывать, что интегральное районирование имеет предварительный научно-аналитический характер. Использованные тематические модели разрабатывались по различным методикам, с применением неодинаковых расчётных показателей и пространственных масштабов, что ограничивает возможности их непосредственного количественного сопоставления. Поэтому результаты комплексного районирования следует рассматривать как основу для предварительной пространственной дифференциации территории, определения приоритетов дальнейших обследований и последующего уточнения проектных решений, а не как окончательную оценку геодинамической опасности конкретных участков.

4. Моделирование возможных прорывов проектируемых водоёмов и оценка их последствий

4.1. Характеристика исследования и принятых сценариев

В рамках выполненных научных исследований проведено моделирование возможных прорывов трёх проектируемых высокогорных водоёмов № 2, 5 и 6, рассматриваемых в составе предполагаемой инфраструктуры территории Кокжайлау. Основной целью работы являлась оценка возможных гидродинамических и геодинамических последствий нарушения целостности водоудерживающих сооружений, определение направлений распространения прорывных потоков и особенностей их взаимодействия со склоновыми и русловыми отложениями. Полученные результаты предназначены для научного обоснования последующих инженерных решений, направленных на обеспечение устойчивости проектируемых сооружений и снижение возможного воздействия на нижерасположенные территории и инфраструктуру.

Методологическую основу исследования составили эмпирические и полуэмпирические методы оценки формирования прорывных волн, моделирование движения водных и селевых потоков по цифровой модели рельефа, анализ морфометрических характеристик водосборов и русловой сети, а также использование материалов исторических селевых событий. Особое внимание уделено возможности вовлечения в движение рыхлого склонового и руслового материала, поскольку при определённых условиях объём формирующегося потока может существенно отличаться от первоначального объёма высвобождаемой воды.

Для каждого из рассматриваемых водоёмов исследованы условные сценарии высвобождения 25%, 50% и 100% содержащегося объёма воды. Такой подход позволил рассмотреть различные масштабы возможного развития прорывных процессов, особенности движения потоков и потенциальные последствия для нижерасположенных участков. Дополнительно изучены условия каскадного развития процессов при возможном взаимодействии потоков, формирующихся из нескольких водоёмов. В расчётах учитывались параметры предполагаемого прорыва, особенности рельефа, условия руслового транспорта и возможность дополнительного вовлечения твёрдого материала.

Рассмотренные сценарии характеризуют возможное развитие прорывных процессов при заданных расчётных условиях и допущениях. Принятые доли

высвобождения воды (25%, 50% и 100%) отражают масштабы моделируемых событий, но не вероятность их возникновения. Полученные результаты позволяют оценивать возможные последствия таких сценариев и могут использоваться проектными организациями при обосновании надёжности водоудерживающих сооружений и разработке необходимых защитных мероприятий.

4.2. Моделирование прорывных потоков и вовлечения твёрдого материала

Одной из основных задач исследования стала оценка изменения параметров водного потока при его движении по горным руслам в случае возможного прорыва проектируемых водоёмов. Особое внимание уделено русловой эрозии и вовлечению в движение рыхлых склоновых и донных отложений, способных увеличивать общий объём потока и изменять его физические характеристики. При моделировании учитывались первоначальный объём высвобождаемой воды, морфометрические особенности русловой сети, свойства рыхлого материала и условия его перемещения.

По результатам моделирования для одного из рассмотренных сценариев прорыва водоёма № 2 при начальном объёме высвобождаемой воды 90 240 м³ получен расчётный объём движущейся селевой массы до 1 039 920 м³. Таким образом, при принятых условиях моделирования общий объём потока может увеличиваться приблизительно в 11,5 раза вследствие вовлечения дополнительного склонового и руслового материала. Указанный результат характеризует один из расчётных вариантов и отражает возможную трансформацию водного потока при взаимодействии с рыхлыми отложениями. Он не является оценкой объёма потока, который обязательно сформируется при возможном нарушении устойчивости сооружения.

Проведённый анализ показал, что характер изменения параметров потока зависит от особенностей рельефа, состояния русловой сети, доступности рыхлого материала и условий его вовлечения в движение. На отдельных участках возможно увеличение объёма переносимой массы за счёт эрозии и поступления наносов, тогда как на других участках могут преобладать процессы замедления движения и аккумуляции материала. Поэтому параметры потока следует рассматривать с учётом последовательного изменения его характеристик по направлению движения, а не только на основании первоначального объёма высвобождаемой воды.

Практическое значение выполненного моделирования заключается в определении особенностей распространения прорывных потоков и выделении участков русловой сети, где взаимодействие воды с рыхлыми отложениями может существенно изменять объём и характер движения селевой массы. Полученные расчётные материалы позволяют учитывать возможное вовлечение дополнительного твёрдого материала, особенности его перемещения и аккумуляции при разработке инженерной защиты нижерасположенных территорий и объектов инфраструктуры.

4.3. Сценарии одновременного прорыва и потенциальные последствия

В рамках выполненного исследования рассмотрены возможные условия совместного формирования прорывных потоков при нарушении устойчивости нескольких проектируемых водоёмов. Особенности рельефа и пространственного расположения водоёмов № 2, 5 и 6 не предполагают непосредственного последовательного поступления воды из водоёма № 2 в водоёмы № 5 и 6. В связи с этим каскадный сценарий рассматривался прежде всего как условный вариант одновременного развития нескольких прорывных процессов под воздействием общего неблагоприятного фактора. Одним из возможных инициирующих воздействий может быть сильное землетрясение, способное вызвать деформации и нарушение устойчивости

водоудерживающих сооружений. При этом вероятность одновременной реализации подобных событий в рамках выполненного исследования не определялась.

Для оценки возможных последствий такого сочетания условий выполнено моделирование одновременного полного прорыва трёх проектируемых водоёмов. При принятых расчётных параметрах суммарный объём селевого выноса составил около 1,9 млн м³, а с учётом коэффициента разрыхления эффективный объём аккумуляции достиг 2,185 млн м³. Полученные значения характеризуют условный расчётный сценарий совместного формирования потоков с вовлечением склонового и руслового материала, а не прогноз фактического развития событий.

Отдельным направлением исследования стало рассмотрение возможного поступления сформировавшегося потока в существующее селехранилище ГЭС-8. По результатам расчётов установлено, что в условиях рассматриваемого сценария поступающий объём соответствует приблизительно 15,1% принятой в расчётах ёмкости селехранилища.

Моделирование одновременного прорыва проектируемых водоёмов позволило оценить параметры возможного совместного формирования селевых потоков и их распространения по нижерасположенным участкам русловой сети. Полученные расчётные характеристики могут использоваться при проектировании гидротехнических сооружений и определении требований к инженерной защите территории с учётом рассмотренного сценария.

4.4. Практическое значение результатов и рекомендации

Результаты моделирования возможных прорывов проектируемых водоёмов № 2, 5 и 6 позволяют учитывать особенности распространения водных и селевых потоков, их взаимодействия с русловыми отложениями и потенциального воздействия на нижерасположенные территории. Полученные расчётные характеристики могут использоваться проектными организациями при определении требований к устойчивости гидротехнических сооружений и обосновании необходимых инженерно-защитных мероприятий.

При проектировании высокогорных водоёмов рекомендуется выполнять специализированные инженерно-геологические, гидрогеологические и гидрологические изыскания и расчёты устойчивости водоудерживающих сооружений с учётом сейсмических и гидрометеорологических воздействий. Следует обосновать решения по регулируемому отводу воды, предотвращению размыва и защите нижерасположенных участков, учитывая возможное вовлечение рыхлого склонового и руслового материала. Состав сооружений, их параметры и эффективность определяются профильными проектными организациями. Рассмотренные сценарии предназначены для оценки возможных последствий и сами по себе не подтверждают безопасность проектируемых водоёмов.

При эксплуатации проектируемых высокогорных водоёмов рекомендуется организовать комплексный мониторинг уровней воды, состояния водоудерживающих сооружений, деформаций склонов и гидрометеорологических условий. Программа наблюдений должна определять контролируемые показатели, периодичность измерений, пороговые значения, порядок оповещения и действия ответственных лиц при выявлении неблагоприятных изменений. Инструментальный контроль и автоматизированные наблюдения следует рассматривать как дополнение к обоснованным проектным решениям и надлежащему содержанию сооружений.

5. Основные научные выводы и рекомендации

Выполненный в 2026 году комплекс научных исследований позволил получить системное представление о природно-климатических, почвенно-экологических и геодинамических особенностях территории Кокжайлау. Установлены основные закономерности пространственного распределения природных факторов, выявлены потенциально неблагоприятные процессы и условия их развития, а также определены возможные изменения климатических характеристик, имеющие значение для размещения и эксплуатации горной инфраструктуры.

Комплексная оценка геодинамической обстановки позволила охарактеризовать особенности развития оползневых, лавинных, эрозионных и селевых процессов, установить их пространственную приуроченность и выделить участки с различным сочетанием природных предпосылок возникновения опасных явлений. Дополнительно выполнено моделирование возможных прорывов проектируемых высокогорных водоёмов, позволившее оценить параметры формирования и распространения прорывных потоков и их потенциальное воздействие на нижерасположенные территории. Полученные результаты характеризуют природные условия и расчётные сценарии, которые необходимо учитывать при разработке технических решений.

Практическим результатом исследований стали тематические карты, материалы геоинформационного анализа, расчётные характеристики природных процессов и научно обоснованные рекомендации, предназначенные для использования профильными инженерными и проектными организациями. В частности, по результатам изучения селевых процессов подготовлен перечень из **31 первоочередного организационного и инженерного мероприятия**, направленного на предупреждение и снижение селевых и сопряжённых природных опасностей.

Таким образом, результаты выполненных исследований сформировали научную основу, которая может использоваться при дальнейшем изучении территории, разработке инженерных решений, а также гидрологических, противоселевых, противолавинных, противооползневых и природоохранных мероприятий. При дальнейшем проектировании рекомендуется сопоставлять варианты размещения объектов с учётом выявленной природной чувствительности, предусматривать расчётное водоотведение, сохранение почвенного материала, поэтапное восстановление нарушенных участков и мониторинг. Конкретные инженерные решения, их параметры и эффективность должны обосновываться профильными проектными организациями на основании изысканий и расчётов. Выполненное исследование не заменяет такого обоснования и само по себе не является заключением о допустимости строительства или достаточности защиты конкретных объектов.