УДК 624.19+556.3

АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ПРИ ПОДЗЕМНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ В ВЫСОКОГОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Исагалиева[1] С.У., Мейманбек[2] к. А.
[1]Институт машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР
[2]Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

Подземное строительство в условиях высокогорья оказывает значительное влияние на гидрогеоэкологическое состояние территории. В результате строительных работ происходит нарушение естественного водного и химического баланса подземных вод и как в зоне непосредственного строительства, так и в смежных районах. Это приводит к региональному истощению ресурсов подземных вод, изменению направлений и объемов их питания, а также нарушению связи с поверхностными водоемами и водотоками. Формируются обширные зоны техногенной аэрации, способствующие деградации природного влажностного режима почв и грунтов, что, в свою очередь, усиливает процессы эрозии, оползней и снижает устойчивость экосистем. В работе рассматривается механизмы загрязнения, последствия для водных и ледниковых объектов и предлагаются рекомендации по минимизации негативного воздействия.

***Ключевые слова*:** подземное строительство, высокогорье, загрязнение вод, подземные воды, поверхностные воды, гидрогеология, техногенное воздействие, экологическая безопасность, водоотведение.

БИЙИК ТООЛУ ШАРТТАРДА ЖЕР АЛДЫНДАГЫ КУРУЛУШТАРДЫ ЖҮРГҮЗҮҮДӨ ЖЕР АСТЫНДАГЫ СУУЛАРДЫН ЖАНА ЖЕР ҮСТҮНДӨГҮ СУУНУН БУЛГАНЫШЫН ТАЛДОО

Исагалиева[1] С.У., Мейманбек[2] к. А.
[1]Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын Механика, автоматика жана геомеханика институту,
[2]И.Раззакова атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университети

Бийик тоолуу шарттарда жер астындагы курулуш аймактын гидрогеоэкологиялык абалына олуттуу таасирин тийгизет. Курулуш иштеринин натыйжасында жер астындагы суулардын табигый суу жана химиялык балансы түздөн-түз курулуш зонасында да, чектеш аймактарда

да бузулат. Бул жер астындагы суулардын ресурстарынын региондук түгөнүшүнө, алардын азыктануу багыттарынын жана көлөмдөрүнүн өзгөрүшүнө, ошондой эле жер үстүндөгү көлмөлөр жана суу агымдары менен байланыштын бузулушуна алып келет. Кыртыштын жана кыртыштын табигый нымдуулук режиминин бузулушуна өбөлгө түзүүчү техногендик аэрациянын кеңири зоналары түзүлүүдө, бул өз кезегинде эрозия, жер көчкү процесстерин күчөтөт жана экосистемалардын туруктуулугун төмөндөтөт. Макалада булгануу механизмдери, суу жана мөңгү объектилери үчүн кесепеттери каралып, терс таасирлерди азайтуу боюнча сунуштар сунушталат.

***Баштапкы сөздөр*:** жер астындагы курулуш, бийик тоолуу аймактар, суунун булганышы, жер астындагы суулар, жер үстүндөгү суулар, гидрогеология, техногендик таасир, экологиялык коопсуздук, сууну агызуу.

ANALYSIS OF GROUNDWATER AND SURFACE WATER POLLUTION DURING UNDERGROUND CONSTRUCTION IN HIGH-ALTITUDE CONDITIONS

Isagalieva[1] S.U., Meimanbek[2] k. A.
[1]Institute of Mechanical Science, Automation and Geomechanics of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic,
[2]Kyrgyz State Technical University named after. I. Razzakov

Underground construction in the highlands has a significant impact on the hydrogeoecological condition of the territory. As a result of construction work, the natural water and chemical balance of groundwater is disrupted both in the area of direct construction and in adjacent areas. This leads to a regional depletion of groundwater resources, a change in the directions and volumes of their supply, as well as disruption of communication with surface reservoirs and watercourses. Extensive zones of technogenic aeration are being formed, contributing to the degradation of the natural moisture regime of soils and soils, which, in turn, enhances the processes of erosion, landslides and reduces the stability of ecosystems. The paper examines the mechanisms of pollution, the consequences for water and glacial objects, and offers recommendations for minimizing negative impacts.

***Keywords*:** underground construction, highlands, water pollution, groundwater, surface waters, hydrogeology, anthropogenic impact, environmental safety, sanitation.

Источники и механизмы загрязнения подземных вод при подземном строительстве.

Под истощением подземных вод понимается сокращение их естественных запасов, обусловленное превышением темпов водоотбора при дренировании водоносных пластов над интенсивностью их пи-тания.

Если при этом происходит бесцельный сброс дренажных вод в речную сеть, то такое истощение наносит прямой экологический ущерб или приводит к существенному ухудшению условий водопользования в горно-строительном районе.

Отбор подземных вод в количестве, превышавшем установленные эксплуатационные запасы, приводит к истощению эксплуатационных ресурсов подземных вод. Этим создается ситуация, когда осушение участка подземного строительства вызывает сокращение планируемых сроков эксплуатации водозаборов хозяйственно - питьевого назначения.

Влияние подземного дренажа максимально проявляется в закрытых артезианских структурах, где сокращение ресурсов артезианских вод носит необратимый характер, и характеризуется перераспределением вод между отдельными водоносными комплексами в зависимости от условия их вскрытия дренажными работами. Кардинальное распределение про-исходит на участках подземных разработок системами обрушения кровли, где за счет техногенной трещиноватости над выработками образуется зона резко нарушенной сплошности «водоупоров».

Изменение исходной гидрохимической обстановки в районах подземного строительства обусловлено инфильтрацией сточных вод из поверхностных техногенных бассейнов, содержащих растворы, образующиеся в процессе горно-строительных работ. Загрязнённые воды могут поступать как с поверхности, нарушенной строительной и горной деятельностью, так и из старых выработок, а также из загрязнённых естественных водоёмов. Однако миграция промышленных стоков с поверхности не единственный путь попадания загрязняющих веществ в подземные горизонты.

Снижение напоров в результате дренажных работ, а также развитие техногенной трещиноватости способствует проникновению низкокачественных вод из более глубоких горизонтов. Это включает отжатие минерализованных поровых растворов из слабопроницаемых толщ и блоков, а также переток загрязнённых вод через незатампонированные скважины.

Дополнительным источником загрязнения подземных вод служат отвалы вскрышных и породных материалов. При взаимодействии с атмосферной влагой в этих отвалах происходит выщелачивание

растворимых минералов, в результате чего формируются инфильтрационные потоки, насыщенные различными химическими компонентами-загрязнителями, проникающими в водоносные горизонты.

Таким образом, загрязнение подземных вод представляет собой деградацию их природного качества физического, химического, биологического и органолептического состава то ведёт к существенному экологическому, социальному и экономическому ущербу.

Типы источников загрязнения подземных вод и их характеристика.

По характеру источника загрязнения подземных вод выделяют:

1. Поверхностные источники, в подавляющем большинстве случаев техногенного происхождения, располагаются на удалении от активных зон разгрузки подземных вод, при этом их объемы часто существенно превышают мощность водоносного комплекса. Это способствует распространению загрязняющих веществ в условиях плановой (горизонтальной) фильтрации. Данный тип источников характеризуется длительной латентной (скрытой) фазой загрязнения, в течение которой загрязняющие вещества не проявляются в составе дренажных вод, отбираемых в водозаборных сооружениях. Основная масса загрязнений, как правило, проникает на незначительные глубины, а степень их воздействия в значительной мере зависит от защитных свойств природных покровных отложений или техногенных насыпей.

2. Подземные бассейны некондиционных вод преимущественно имеют естественное происхождение, хотя в некоторых случаях их формирование может быть обусловлено техногенными воздействиями — в частности, растворением горных пород под влиянием изменённой физико-химической обстановки в водоносных горизонтах. Эти бассейны, как правило, располагаются на значительной глубине по отношению к исходному уровню подземных вод. В редких случаях образование некондиционных вод может быть связано с естественной плановой гидрохимической зональностью внутри водоносного пласта.

Во всех вариантах ключевым фактором, определяющим вероятность и степень загрязнения подземных вод, является режим водоотбора. Так называемая “скрытая” фаза загрязнения может быть относительно краткосрочной, если она ограничивается периодом подтягивания некондиционных вод из глубинных частей пласта. Однако поступление таких вод из слабопроницаемых межпластовых толщ в эксплуатируемый горизонт может проявиться лишь спустя длительное время после начала дренажных или водоотборных работ.

По степени гидродинамического влияния на подземные воды среди поверхностных источников загрязнения выделяют:

- Гидродинамически активные источники;
- Гидродинамически пассивные источники.

Классификация основана на характере изменений, которые данные источники вызывают в структуре естественного подземного потока. Ключевым параметром, определяющим тип источника, является соотношение между расходом утечек загрязнённых (промышленных) стоков из техногенных бассейнов и величиной естественного фильтрационного потока в зоне воздействия. Это соотношение определяет степень смешения техногенных и природных (пластовых) вод, а также скорость и масштаб распространения загрязнения.

Причины, условия и последствия прорывов воды при строительстве подземных сооружений.

Прорыв воды является одним из наиболее опасных видов фильтрационных деформаций, часто возникающих при строительстве подземных сооружений в относительно водоупорных породах при несниженных напорах в соседних водоносных горизонтах. В результате таких прорывов нередко оказываются затопленными или заполненными суспензиями километры подземных выработок.

Прорывы воды представляют собой катастрофическое явление, приводящее к затоплению, заиливанию или запесочиванию подземных сооружений, потере горной техники и выводу из строя на длительный срок отдельных участков объекта.

Основные причины возникновения прорывов:

• недостаточный объём дренажных работ по осушению водоносных пород в пределах зоны выемки;

• нарушение технологических режимов строительства (например, обрушение пород в незакреплённой части выработки, несвоевременное бурение дренажных скважин, запуск сооружения в эксплуатацию до завершения осушения участков);

• неблагоприятный геологический разрез и литологический состав пород (преобладание мощных слоёв песчаников, известняков, отсутствие водоупорных глинистых прослоев);

• внезапное вскрытие геологических нарушений, зон, в которых отсутствует сплошность водоупорных слоёв;

• низкая устойчивость пород на горизонте, где проводится подработка, особенно при малой глубине залегания водоносного объекта и крупных обрушениях;

• недостаточная кратность подработки (отношение глубины подработки к мощности выемочного пласта);

• малая мощность покровных отложений, перекрывающих водопроводящие слои;

• обнажение коренных водопроводящих пород (песчаников, песчанистых сланцев, известняков) в пределах чаши водохранилища;

• наличие в районе водохранилища разведочных скважин, старых шурфов, сбойных выработок, провалов поверхности и других элементов, обеспечивающих гидравлическую связь с подземным сооружением.

Оценка вероятности прорывов воды в подземные сооружения предполагает выявление прямой или косвенной связи между подземными выработками и существующими источниками воды. Такая связь может быть естественной либо вызвана фильтрационными деформациями и нарушениями сплошности экранирующих пород под воздействием гидростатического и горного давления.

Однако при горно-строительных работах в толще песчано-глинистых пород с частичным или полным обрушением кровли выработок прорывы воды могут быть связаны с комплексными гидрогеомеханическими процессами в подработанном массиве — так называемыми наведёнными сдвижениями, которые можно условно разделить на три основные группы (рис.1).

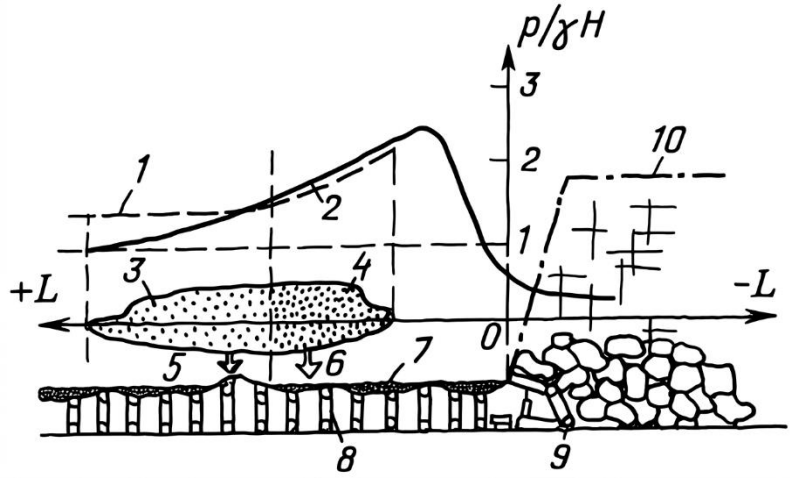


Рис. 1. Схема нагружения линзы пористых пород в зоне опорного давления: 1— график изменения порового давления в линзе пористых пород; 2 — зависимость опорного давления p от расстояния L до забоя на глубине H; 3 — зона пород, временно находящаяся в состоянии упругого сжатия; 4 — зона пород с нарушенной структурой; 5, 6 — участки возможного прорыва соответственно разжиженной породы или воды с частичным выносом материала из слабосцементированных пород в зонах

ослабления кровли выработки; 7 — кровля пласта; 8 — выработка (подготовительная); 9 — очистной забой; 10 — граница зоны трещин в кровле выработанного пространства.

Структура водных ресурсов и источники питания речной сети Кыргызстана.

Территория Кыргызстана расположена между высотами 401 и 7739 м над уровнем моря (пик Победы). 40,3 % площади страны находится на высоте 3000 м и выше. Горный рельеф обусловил формирование разветвленной речной сети, здесь насчитывается около 5 тыс. рек, которые относятся к восьми гидрологическим бассейнам — рек Сыр-Дарья, Аму-Дарья, Чу, Талас, Или (Кар-Кыра), Тарим и бессточных озер Иссык-Куль и Чатыркуль. Основным источником, пополняющим водные ресурсы, являются осадки, на количество которых, как и в других горных странах, значительное влияние оказывает лесистость горных склонов, состояние ледниковых и лесных экосистем. Ледники Тянь-Шаня и Памиро-Алая для многих рек являются основным источником питания. Наибольшее число рек (до 46 %) характеризуется ледниково-снеговым типом питания, около 43 % рек имеют снеговоледниковое питание, значительно меньше рек снегового питания (10 %), еще меньше рек имеющих снегово-дождевое питание. Доля ледниковых вод в годовом объеме стока меняется от 5,9 % у р. Сыр-Дарьи и достигает 48,9 % у р. Сары-Джаз. Почти все реки в той или иной мере получают дополнительное питание за счет разгрузки подземных вод (рис.2).

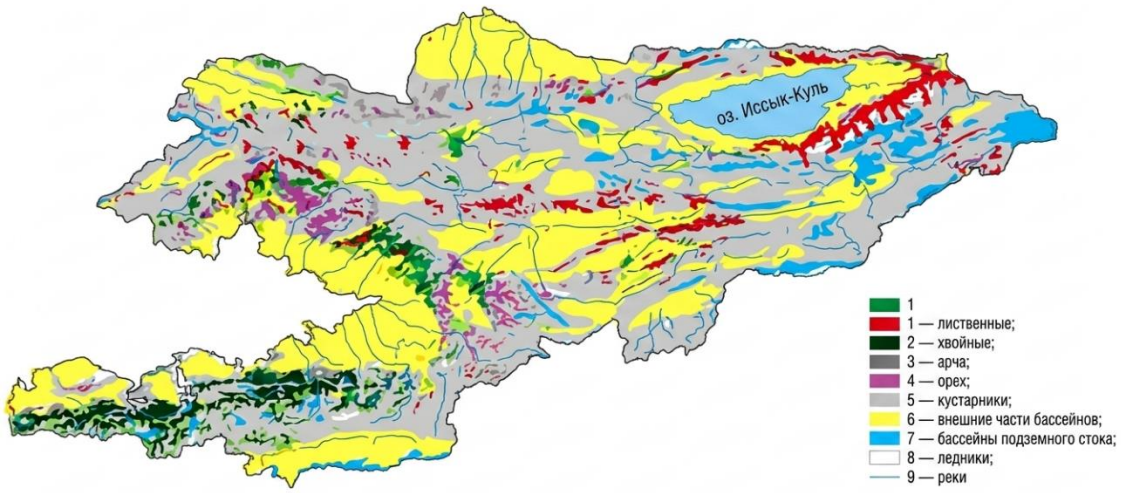


Рис.2. Схематическая карта бассейнов подземного стока Кыргызстана с основными экосистемами.

Формирование и распространение загрязнения вод при подземной разработке высокогорных месторождений.

Подземное строительство на высокогорных месторождениях Кыргызстана сопровождается рядом экологических рисков, среди которых особую обеспокоенность вызывает загрязнение подземных и поверхностных вод. В условиях высокогорья, где гидрогеологические системы обладают высокой чувствительностью к техногенным воздействиям, нарушения естественного режима водообмена происходят особенно быстро и с трудно обратимыми последствиями.

На месторождениях, таких как Кумтор, Джеруй, Талды-Булак Левобережный и других, строительные и эксплуатационные процессы сопровождаются вскрытием водоносных горизонтов, образованием техногенных дренажей, утечками промышленных вод, а также разрушением ледниковых и наледных систем. В таких зонах наблюдается изменение химического состава подземных вод вследствие инфильтрации сточных растворов, насыщенных тяжелыми металлами (например, мышьяком, свинцом, ртутью), а также строительными реагентами и нефтепродуктами.

Дополнительно загрязнение усугубляется нестабильностью геологических пород, активным выщелачиванием вскрышных материалов и высокой скоростью фильтрации в зонах трещиноватости. Наличие ледников и сезонных потоков способствует ускоренному переносу загрязняющих веществ в нижележащие долины, где формируются источники питьевого и орошательного водоснабжения. Учитывая ограниченные запасы пресных вод в высокогорных районах Кыргызстана, проблема техногенного загрязнения требует комплексного мониторинга, оценки степени риска и внедрения современных методов защиты и восстановления водной среды (таблица 1).

Таблица 1

№	Место-рождение	Основные загрязня-ющие вещества	Источники загрязнения	Потенци-альное воздействие на водные ресурсы
1	Кумтор	Мышьяк, ртуть, свинец, сульфаты, нефтепродукты	Хвостохранили ща, вскрышные породы, дренажные воды	Загрязнение рек и подземных вод, нарушение ледникового баланса

2	Джеруй	Цианиды, тяжелые металлы, строительные реагенты	Подземные выработки, хвостохранилища	Загрязнение подземных вод, риск для питьевого водоснабжения
3	Талды-Булак Левобережный	Сульфаты, железо, марганец, нефтепродукты	Дренажные воды, утечки из технологических трубопроводов	Загрязнение поверхностных вод, ухудшение качества воды
4	Тоголок	Тяжелые металлы, строительные материалы	Подземные разработки, строительные площадки	Загрязнение подземных вод, влияние на близлежащие водоёмы

Мониторинг и инженерная защита подземных вод от загрязнения.

Основой инженерной защиты подземных вод от загрязнения является мониторинг подземных вод.

Мониторинг подземных вод представляет собой часть более широкой системы — экологического мониторинга. В рамках этой системы используются следующие методы:

1. Аналитический метод — определение химического состава и свойств проб газообразной и водной среды с помощью инструментальных или лабораторных устройств и приборов.
2. Биоиндикационный метод — оценка интегральных характеристик состояния воздуха, воды и почвы по реакциям растительных и животных сообществ.
3. Гидрогеологический метод — исследование элементов и параметров естественных или искусственно нарушенных фильтрационных полей.
4. Геофизический метод — позволяет оценивать влажность, минерализацию, напряжённое состояние, направление движения подземных вод и состояние искусственных грунтов.
5. Дистанционный метод — основан на интерпретации и дешифрировании аэро- и космических снимков для выявления изменений в природной среде.

В системе мониторинга подземных вод выделяют три основных метода управления их состоянием: охрана, защита и реабилитация.

Охрана подземных вод — это комплекс запретительных и разрешительных мер, направленных на предотвращение негативных изменений количественных и качественных характеристик подземных вод.

Примером такой деятельности является установление зон и округов санитарной охраны водозаборов. Для их проектирования используются соответствующие нормативно-методические документы (СНиПы, СанПиНы и др.).

Защита подземных вод предполагает комплекс инженерных мероприятий, направленных на ограничение во времени и пространстве негативного воздействия инженерных сооружений и/или хозяйственной деятельности на подземные воды и другие компоненты экосистемы.

Наиболее распространённые меры защиты включают:

- искусственное пополнение запасов подземных вод в целях предотвращения их истощения;
- изоляцию потенциальных или действующих источников загрязнения с использованием экранов, завес, дренажей и других конструкций;
- локализацию пятен загрязнения с помощью отвлекающих водозаборов, противофильтрационных завес, барьеров, грунтовых стен и др.

Реабилитация подземных вод — это восстановление их экологически приемлемых свойств и качеств (вместе с другими компонентами природной среды).

Для этого применяются меры профилактики в сочетании с инженерными, биологическими, химическими и социальными средствами.

Примером реабилитации может служить очистка водоносных горизонтов и зоны аэрации от нефтепродуктов с использованием специализированных культур микроорганизмов.

Все методы инженерной защиты подземных вод от загрязнения условно делятся на две группы:

1. Профилактические — направлены на предотвращение загрязнения.
2. Активные — предназначены для ограничения или ликвидации уже возникшего загрязнения.

Применение методов мониторинга подземных и поверхностных вод на горнорудных месторождениях Кыргызстана.

На горнорудных месторождениях Кыргызстана применяется комплексный подход к мониторингу подземных и поверхностных вод, включающий различные методы оценки состояния водной среды. Одним из основных является аналитический метод, при котором на месторождении Кумтор регулярно отбираются пробы дренажных и поверхностных вод. Эти образцы исследуются в лабораторных условиях на содержание тяжёлых металлов (ртуть, свинец, мышьяк), цианидов и нефтепродуктов. Полученные данные позволяют своевременно выявлять отклонения от предельно допустимых концентраций и оперативно реагировать на угрозу загрязнения.

Дополняет его биоиндикационный метод, который активно используется в окрестностях месторождения Джеруй. Здесь наблюдают за изменениями в структуре и численности сообществ флоры и фауны. Например, снижение численности макрозообентоса или ухудшение состояния водной растительности может свидетельствовать о нарушении гидрохимического равновесия и наличии загрязнений.

Гидрогеологический метод широко применяется на месторождении Талды-Булак Левобережный, где осуществляется регулярный контроль уровня подземных вод в специально оборудованных скважинах. Особое внимание уделяется зонам вблизи карьеров и хвостохранилищ, где наблюдается активная фильтрация в естественных и нарушенных геологических структурах. Эти данные позволяют оценить риски проникновения загрязнённых вод в водоносные горизонты.

Дистанционный метод активно применяется в районе Кумтора и ледников Петрова. С помощью анализа спутниковых снимков отслеживаются изменения ледниковых масс, движение наледей и сезонные колебания стока. Это помогает прогнозировать риски загрязнения, связанные с таянием ледников, а также выявлять нелегальные водоотводы и скопления потенциально опасных веществ на поверхности.

Вывод. Несмотря на значительные экологические риски, сопровождающие подземное строительство на горнорудных месторождениях Кыргызстана, в стране формируется комплексная система инженерной и экологической защиты подземных вод. Применение современных методов экологического мониторинга, включая аналитические, гидрогеологические, биоиндикационные, геофизические и дистанционные подходы, обеспечивает своевременное выявление негативных изменений водной среды, прогнозирование их развития и обоснованное принятие природоохранных решений.

Реализация профилактических и активных мероприятий по защите и восстановлению подземных вод способствует снижению техногенной нагрузки на гидрогеологические системы и сохранению устойчивости горных экосистем. Данный подход отражает переход к экологически ориентированному природопользованию и формирует научно обоснованную основу для устойчивого развития горнодобывающей отрасли с учетом долгосрочных экологических последствий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Картозия Б.А., Федунец Б.И., Шуплик М.Н. и др. Шахтное и подземное строительство.–М.: Изд-во Академии горных наук, 2001.- Том II.-582 с.: ISBN 5-7892-0080-X.
2. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом Кыргызской Республики. – Бишкек, 2025.
3. Zaginaev V. V. et al. Monitoring the Development of Potential Hazardous Mountain Lakes Using Remote Sensing in the Kyrgyz Republic. International Journal of Geoinformatics, 2024.
4. Piroton V., Havenith H.-B. National Inventory of Glacial Lakes in Kyrgyzstan: Integrating Remote Sensing for Hazard Assessment and Monitoring. EGU General Assembly, 2025.
5. Van Tricht L. et al. Reconstruction of glacier mass balance in the Tien Shan, Kyrgyzstan. Frontiers in Earth Science, 2021.
6. EGUsphere. High-resolution mapping of glacial lake expansion in Kyrgyzstan (2016–2024) using Sentinel-2 imagery, 2026.