

АННОТАЦИЯ

к диссертации на соискание ученой степени
доктора философии (PhD) по специальности 6D071100 – Геодезия
Нурақынова Серика Маратовича

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ ГОРНЫХ КРИОСФЕР С ПРИМЕНЕНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Общая характеристика работы. Диссертация посвящена исследованию компонентов криосферы Жетысу Алатау на основе спутниковых технологий. Основные задачи исследования заключаются в следующем: определение пространственно-временной динамики изменения горных ледников с использованием спутниковых данных; создание полного каталога каменных ледников и установление их точных границ; разработка модифицированной методики инвентаризации активных каменных ледников; расчет геодезического массового баланса ледников и оценка его изменений. Результаты исследования позволят прогнозировать устойчивость водоресурсного потенциала региона Жетысу и моделировать роль ледников в региональных гидрологических системах.

Актуальность темы. В результате глобального изменения климата основные компоненты горной криосферы – ледники, снежный покров и каменные глетчеры (rock glaciers) – подвергаются значительной пространственно-временной трансформации. Элементы криосферы, расположенные в горных системах Центральной Азии и на территории Казахстана, за последние 50 лет претерпели существенную деградацию: площадь ледников в горной системе Тянь-Шань сократилась примерно на 30-40%, а в Жетысу Алатау – на 40-50%. Эти изменения оказывают прямое воздействие не только на гидрологический режим региона, устойчивость экосистем и социально-экономическую деятельность, но и относятся к числу пространственно-динамических процессов, требующих высокоточных геодезических наблюдений. Традиционные геодезические методы имеют ограниченные возможности для регулярного и масштабного мониторинга подобных процессов. В этой связи на первый план выходят средства космической геодезии – радиолокационная интерферометрия (InSAR), глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS) и спутниковый оптический мониторинг, которые позволяют эффективно отслеживать криосферные изменения с высокой точностью и широким пространственным охватом.

Оценка состояния горной криосферы и моделирование её пространственно-временной динамики представляют собой стратегически важную научную задачу в контексте эффективного планирования инфраструктуры, рационального управления природными ресурсами и прогнозирования климатических рисков.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является в комплексной оценке состояния и динамики изменений основных компонентов горной криосферы Жетысу Алатау на основе спутниковых технологий, включая анализ пространственно-временной динамики площади ледников, расчет геодезического массового баланса и составление каталога каменных глетчеров.

В рамках достижения цели поставлены следующие задачи:

- Проведение анализа пространственно-временной динамики изменения площади ледников Жетысу Алатау на основе спутниковых (оптических) данных;
- Составление каталога каменных глетчеров (rock glaciers) Жетысу Алатау на основе спутниковых данных и их классификация по степени активности;

- Разработать модифицированную методику инвентаризации активных каменных глетчеров на основе использования спутниковых данных;
- Провести оценку изменений высот ледников и выполнить расчёт геодезического баланса масс (geodetic mass balance) ледников Жетысу Алатау на основе спутниковых данных.

Объект исследования – Компоненты криосферы горных хребтов Жетысу Алатау.

Научная новизна.

- Впервые выполнено картирование динамики изменения площади ледников (за период 1956–2016 гг.) и составлен каталог каменных глетчеров (с 1990 г.) Жетысу Алатау на основе спутниковых данных.
- Модифицирована методика инвентаризации активных каменных глетчеров.
- Впервые составлены карты высотных изменений ледников и геодезического баланса масс (geodetic mass balance) ледников Жетысу Алатау на основе спутниковых данных.

Научные положения, выносимые на защиту.

- Карта динамики изменения площади ледников Жетысу Алатау за период 1956–2016 гг. (площадь ледников сократилась на $49 \pm 2,8$ % (с 813,6 до 414,6 км²), а их количество уменьшилось с 985 до 813). Цифровой каталог, (включающий 848 каменных глетчеров общей площадью 83,4 км²).
- Модифицированная методика идентификации активных каменных глетчеров.
- Карты высотных изменений и геодезического баланса масс ледников Жетысу Алатау за период 2000–2016 гг.

Методы исследования

Для решения поставленных научных задач, на основе анализа и обзора современных методов и методологических подходов, был использован следующий комплекс методов:

- Для анализа пространственно-временной динамики изменения площади ледников: в этом направлении применялись методы мультиспектральных оптических спутниковых снимков и визуальной интерпретации. В частности, использовался метод порогового соотношения каналов (band ratio), что обеспечило высокую точность в определении границ ледников.
- Для составления каталога каменных глетчеров (rock glaciers) использовалась комбинация двух основных подходов: а) геоморфологический анализ – определение морфологических характеристик на основе цифровых моделей рельефа (DEM) и спутниковые изображения; б) кинематический анализ – оценка динамики движения каменных глетчеров с использованием данных радиолокационной интерферометрии (InSAR).
- Оценка геодезического массового баланса ледников: для этого производилось математическое сравнение двух цифровых моделей высот земной поверхности – исторической SRTM (2000 г.) и современной TanDEM-X (после 2010 г.). В результате расчетов были определены пространственное распределение и объёмные изменения массы ледников.

Описание основных результатов исследования.

1. Анализ пространственно-временной динамики изменения площади ледников Жетысу Алатау на основе спутниковых (оптических) данных. В рамках исследования была проанализирована динамика пространственно-временных изменений площади ледников в семи основных речных бассейнах Жетысу Алатау за период 1956–2016 гг. Были рассчитаны количественные показатели скорости деградации ледников, что позволило выявить

долгосрочные тенденции. По результатам анализа данных за 2001 год было зарегистрировано 1040 ледников общей площадью 517,4 км², которые были включены в обновлённый каталог. За 2012 год количество ледников составило 938 с общей площадью 453,7 км², а за 2016 год – 896 ледников с общей площадью 414,6 км². За весь рассматриваемый период (1956–2016 гг.) общая площадь ледников сократилась с 813,6 км² до 414,4 км², что составляет сокращение на $49 \pm 2,8\%$. Кроме того, для крупнейших ледников были определены высоты линий равновесия (Equilibrium-Line Altitude), а также проведён анализ факторов, влияющих на таяние ледников.

2. *Составление каталога каменных глетчеров (rock glaciers) Жетысу Алатау и определение их морфодинамических характеристик на основе спутниковых данных.* Методы идентификации и классификации каменных глетчеров в Жетысу Алатау были модифицированы и адаптированы к условиям региона. В результате исследования было зарегистрировано 848 каменных глетчеров общей площадью 83,4 км², на основе чего был составлен единый цифровой каталог. Согласно морфодинамическому анализу, наибольшая часть каменных глетчеров (70,51 км² или 84,5% от общей площади) сосредоточена на высотах от 2800 до 3400 м над уровнем моря. Площадь самого крупного глетчера составила 1,53 км², самого малого – 0,0043 км². На основе технологии InSAR была рассчитана скорость движения каменных глетчеров. Результаты показали, что: – в бассейне реки Аксу зарегистрировано 93 активных каменных глетчера со средней скоростью движения 240 мм/год; – в бассейне реки Лепсы – 111 глетчеров со средней скоростью 252 мм/год. Также была разработана модифицированная методика инвентаризации активных каменных глетчеров, точность которой была подтверждена спутниковыми данными. По происхождению глетчеры были классифицированы как обвальные (talus rock glaciers) и моренные (moraine rock glaciers), и проведён анализ их регионального распределения.

3. *Оценка и расчёт геодезического массового баланса горных ледников Жетысу Алатау с использованием спутниковых данных.* Для оценки изменений высоты и массы ледников Жетысу Алатау было проведено математическое сравнение двух цифровых моделей рельефа земной поверхности: исторической (SRTM, 2000 г.) и современной (TanDEM-X, после 2010 г.). На региональном уровне средний годовой геодезический массовый баланс ледников был оценён как –0,44 m w.e. Наибольшее уменьшение массы ледников зафиксировано: – в бассейне реки Иргайты – –0,59 m w.e.; – в бассейне реки Тентек – –0,55 m w.e. Наименьшие значения зафиксированы: – в бассейне Аксу – –0,35 m w.e.; – в бассейне Лепсы – –0,38 m w.e.; – в бассейне Каратал – –0,40 m w.e.

Проведённые исследования и предложенные методики позволяют значительно сократить трудовые и финансовые затраты при изучении состояния оледенения в горных районах Центральной Азии, а также способствуют эффективному ведению регионального мониторинга криосферы.

Теоретическая и практическая значимость работы. *Вклад в гляциологию и исследования криосферы.* На основе изучения пространственно-временной динамики ледников и каменных глетчеров (rock glaciers) Жетысу Алатау были выявлены закономерности воздействия региональных климатических изменений на компоненты криосферы. Модифицированные методы классификации и каталогизации каменных глетчеров дополнили теоретико-методологическую базу для изучения морфодинамических процессов. *Расширение базы данных.* Впервые была систематизирована крупномасштабная информация об изменении площади ледников за период 1956–2016 гг., что формирует важную научную базу для дальнейших гляциологических и климатологических исследований.

Практическая значимость работы. Оценка скорости деградации ледников позволяет прогнозировать доступность водных ресурсов региона в будущем. Полученные данные могут быть использованы в управлении водными ресурсами, распределении воды для сельского хозяйства, а также в планировании и оптимизации гидроэнергетической

инфраструктуры. *Определение скорости движения каменных глетчеров* послужило основой для разработки превентивных мер по снижению рисков стихийных бедствий, таких как сели, лавины и прорывы моренных озёр. Например, выявление активных каменных глетчеров со скоростью движения около 240 мм/год в бассейне реки Иргайты позволяет повысить уровень готовности к чрезвычайным ситуациям в *этом районе*. *Среднее значение расчетного баланса масса ледников (-0,44 m w.e.)* указывает на тенденцию постепенного перехода климата региона к более засушливым условиям. Этот показатель является важной научной основой для разработки стратегий адаптации, направленных на обеспечение устойчивости экосистем. Кроме того, разработанные карты и модели, позволяют учитывать риски при планировании региональной инфраструктуры (дороги, мосты), в том числе при строительстве планируемой атомной электростанции (АЭС) в районе озера Балхаш. Реки, берущие начало в этом горном хребте - Аксу, Каратал и Лепсы - обеспечивают около 20% объёма вод, питающих озеро Балхаш, что подчёркивает их ключевую роль в формировании гидрологического режима водоёма.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются следующим. Применённые в исследовании спутниковые технологии – радиолокационная интерферометрия (InSAR) и анализ оптических изображений – на сегодняшний день признаны международным научным сообществом как эффективные методы для изучения ледников и каменных глетчеров. Эти методы широко используются в научных программах NASA и ESA. Сравнение данных SRTM (2000 г.) и TanDEM-X (с 2010 г.) при расчёте геодезического массового баланса ледников считается современным «золотым стандартом».

Для оценки влияния климатических и антропогенных факторов использовались метеорологические данные, предоставленные РГП «Казгидромет». Были применены методы регрессионного анализа и расчёта коэффициентов корреляции, которые являются научно обоснованными и апробированы в климатологических исследованиях. Качество и точность разработанного каталога каменных глетчеров проверены в соответствии с международными стандартами программы Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS).

Достоверность выводов: Сокращение площади ледников Жетысу Алатау на 40–50% в период 1956–2016 гг. является ярким индикатором деградиционных процессов в регионе. Эти значения соответствуют средним темпам сокращения ледников в Центральной Азии (около 0,5–1% в год), зафиксированным в авторитетных источниках, включая доклад IPCC за 2019 год. Динамика ледников Жетысу Алатау также сопоставима с результатами исследований в Тянь-Шане и Памире (например, Farinotti et al., 2019). Среднее значение рассчитанного геодезического массового баланса (-0,44 m w.e.) близко к аналогичным показателям для ледников Гренландии и Гималаев, что подтверждает пространственную и климатическую актуальность полученных данных.

Результаты исследования опубликованы в рецензируемых международных научных журналах **Remote Sensing** и **Water**, что свидетельствует о качестве выполненных исследований и признании научным сообществом. Таким образом, научная обоснованность применённых методов подтверждена международными стандартами, достоверность выводов - независимыми источниками данных, а прикладная ценность рекомендаций - государственными стратегиями. Это исследование вносит значительный вклад в укрепление связи между научной методологией и практическими решениями.

Связь темы с планом научно-исследовательских работ и различными государственными программами. Данное исследование выполнено в рамках научного проекта «Оценка баланса массы ледников в региональном масштабе и инвентаризация каменных глетчеров Жетысуского Алатау с использованием данных дистанционного зондирования», финансируемого Комитетом науки на 2020–2022 годы (номер проекта: AP08856470).

Публикации и апробация работы. По теме диссертационного исследования было опубликовано 5 научных работ. Из них 3 статьи были опубликованы в рецензируемых международных научных журналах с высоким импакт-фактором, входящих в базы данных Scopus и Web of Science. В частности, 2 статьи вышли в журнале Remote Sensing (процентиль – 91, категория Q1), а одна обзорная статья – в журнале Water (Процентиль – 84, категория Q1). Кроме того, 2 статьи были опубликованы в научных изданиях, входящих в перечень журналов, рекомендованных Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан.

Личный вклад докторанта в подготовку каждой статьи

В статье «The first Inventory of Rock Glaciers in the Zhetysu Alatau: the Aksu and Lepsy River Basins» докторантом была выполнена работа по инвентаризации каменных глетчеров на территории Жетысу Алатау, в частности, в анализе пространственного распределения, морфологических характеристик и классификации по происхождению каменных глетчеров в бассейнах рек Аксу и Лепсы. В рамках исследования он занимался модификацией методологии инвентаризации с применением данных спутникового дистанционного зондирования и геопространственных технологий. Кроме того, внесен существенный вклад в обработку и интерпретацию радиолокационных данных с использованием технологии InSAR.

Во второй статье «Accelerated Glacier Area Loss in the Zhetysu (Dzhungar) Alatau Range (Tien Shan) for the Period of 1956–2016» докторант выступил основным автором в исследовании динамики изменения площади ледников Жетысу Алатау. Проведён количественный анализ изменений площади ледников на основе спутниковых данных и аэрофотоснимков за период 1956–2016 годов. Докторант также осуществил структурирование материала, обобщение результатов исследования и формулирование научных выводов.

В обзорной статье «Application of Artificial Intelligence in Glacier Studies: A State-of-the-Art Review» докторантом проведена систематизация и анализ научной литературы, посвящённой применению технологий искусственного интеллекта в гляциологических исследованиях. Выполнен глубокий анализ тематических работ, дана оценка потенциала применения методов ИИ для исследования ледников. Докторантом также осуществлено структурирование материала и подготовлен комплексный научный обзор, отражающий текущее состояние и перспективы развития данного направления.