

**Марченко Е.С., Муравьев Я.Д.**

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, eklmnk@gmail.com

## **ВЛИЯНИЕ НЕКЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДНИКОВ СРЕДИННОГО ХРЕБТА, КАМЧАТКА**

Современные колебания ледников в горных районах оказывают большое влияние на динамику ландшафтов и экосистем, а также режим и объем стока горных рек. Стихийно-разрушительные процессы ледникового генезиса относятся к числу наиболее опасных природных явлений в горах и могут активизироваться на фоне происходящих активных изменений ледников. При этом понятие «опасные гляциальные (ледниковые) процессы» до сих пор отсутствует в российских нормативных технических документах [5, 6]. Все это подчеркивает актуальность задачи мониторинга состояния ледников и анализа определяющих факторов. При этом наряду с привалирующей ролью изменяющегося климата, на скорость отступления ледников могут оказывать влияние другие неклиматические факторы.

В данной работе рассматриваются методические подходы к визуализации, расчету и оценке роли неклиматических факторов во временной динамике ледников на примере Срединного хребта на п-ве Камчатка, которые могут быть использованы в других горных районах. К неклиматическим факторам относятся рельеф, роль которого может быть оценена через морфометрические характеристики ледников, геометрические параметры ледников, лавинная активность с прилегающих склонов, заморенность поверхности ледников, вулканизм. Привнос лавинами дополнительного снега может приводить к тому, что баланс массы ледников с доминирующим вкладом лавинного питания в условиях потепления климата может оставаться более положительным, чем у ледников без значимой доли лавинного питания [4]. Подготовленные в работе материалы и методические разработки могут быть в дальнейшем использованы для оценки вклада снежных лавин в питание ледников.

Воздействие вулканов на олединение может быть прямым – например, разрушение ледника в результате извержения активного вулкана, или косвенным – ввиду высокой нестабильности и подверженности эрозии вулканических ландшафтов. В настоящий момент на севере Срединного хребта нет активных вулканов, поэтому в рамках данного исследования влияние вулканического фактора ограничивается накоплением в теле и на поверхности ледника большого количества обломочного материала за счет разрушения рыхлых склонов голоценовых вулканов. Это приводит к образованию у некоторых ледников мощной поверхностной морены и шлейфов мертвого льда.

В анализируемую базу данных вошли 222 ледника Срединного хребта. Контуры ледников на 1950 г. были отдешифрованы по мозаике аэрофотоснимков (разрешение ~2 м), составленной авторами по материалам

облетов 1949–1950 гг. Контуры ледников на 2002 и 2016 гг. были получены с помощью космических снимков LandSAT 7ETM+ и LandSAT 8OLI (разрешение 15 м). Наряду с движущимся льдом также дешифрировались шлейфы мертвых льдов, моренные гряды вне ледникового тела и поверхностная морена. При этом в базу данных вносились только ледники, чьи границы дешифрировались по снимкам с достаточной достоверностью. Для каждого ледника рассчитывались геометрические характеристики – площадь, выпуклость формы (отношение площади к периметру), средняя мощность и объем льда по формуле Ерасова [1]. Отдельно вычислялась площадь поверхностной морены (абсолютная и относительная) и шлейфа мертвого льда, в случае их наличия. Морфометрические параметры ледников (абсолютная высота наивысшей и наименьшей точки, средний уклон, экспозиция) были вычислены с помощью ЦМР Aster V2 2011 с разрешением 30 м, которая была предварительно обработана и «очищена» от артефактов [8].

Для более детального анализа влияния заморенности на отступление ледников по снимкам LandSAT 5TM, 7ETM+, 8OLI производился расчет альбедо ледниковой поверхности. Для этого использовались зеленый и ближний инфракрасный каналы с разрешением 30 м. Космические снимки подвергались обработке с помощью автоматизированных алгоритмов, реализованных авторами на программном языке Python с использованием библиотек Arcpy Spatial Analyst для обработки растровых изображений.

Используемые снимки LandSAT относятся к серии продуктов высокого уровня и поэтому уже были очищены от атмосферных эффектов, т.о. снимки предоставляют информацию об отражательной способности поверхности Земли, а не верхней границы атмосферы [13]. Тем не менее снимки необходимо было очистить от эффекта топографической тени, что было осуществлено с использованием алгоритма сопоставления уклонов, разработанного для горных ледниковых районов [7]. Также были введены поправки на анизотропность отражения света поверхностью снега и льда с помощью эмпирически полученных двулучевых функций отражательной способности (BRDF) по методикам [9, 11]. Последним шагом стала конвертация спектральной отражательной способности (альбедо) в общий показатель (narrowband to broadband conversion) по эмпирической формуле из работы [10]. В результате были получены карты пространственной вариации альбедо ледниковой поверхности на разные годы (2000, 2002, 2011, 2014, 2016 гг.) с разрешением 30 м. Исходя из значения альбедо было выделено три класса поверхности ледников – снег, лед, поверхностная морена или загрязненный лед. Площадь каждого из классов относительно общей площади ледника использовались для оценки влияния фактора заморенности на скорость отступления ледников. Также данная методика расчета альбедо может быть использована для выделения конусов лавинного снега на поверхности ледников и оценке роли лавинного питания в их балансе массы.

Оценка влияния неклиматических факторов на изменение площади ледников с 1950 по 2016 гг. проводилась методом регрессионного анализа. Одним из самых значимых факторов стал размер ледников, а также выпуклость их формы. Из морфометрических показателей наличие значимой связи со скоростью сокращения площади ледников показала абсолютная высота наивысшей точки ледника и относительное превышение между низшей и высшей точками ледника. Это косвенно указывает на большую роль климатических факторов (осадки и температура) в наблюдаемых изменениях площади оледенения. Анализ влияния заморенности ледникового тела на скорость его отступления еще продолжается.

ГИС–слои, отражающие состояние ледников Срединного хребта (на 2016 г.), а также проявления голоценового вулканизма [3] были опубликованы в виде интерактивной веб-карты (<https://elenamarch.github.io/>), созданной авторами с помощью библиотеки Leaflet [12] на языке Java Script. Карта поддерживает функции измерения расстояний, рисования новых объектов, их скачивания и подгрузки при новом открытии и не требует установки какого-либо программного обеспечения помимо браузера. Во всплывающих окнах при наведении на объект приводятся фотографии и данные об объекте – в случае ледников это название, номер по каталогу [2], площадь, оцененная мощность и объем, высотный пояс, средний уклон.

*Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 18-35-00419 «Исследование вклада снежных лавин в питание ледников при недостатке данных прямых наблюдений», а также гранта ДВО РАН № 18-5-075 «Разработка методов выделения и оценки территориального сочетания экстремальных природных процессов с использованием ГИС-технологий» по программе «Дальний Восток».*

### Список литературы

1. Ерасов Н.В. Метод определения объема горных ледников // МГИ. 1968. Вып. 14. С. 307–308.
2. Каталог ледников СССР. Т. 13–15. Л.: Гидрометеиздат, 1968–1980.
3. Певзнер М.М. Голоценовый вулканизм Срединного хребта Камчатки // Труды Геологического института. М.: ГЕО, 2015. Вып. 608. 252 с.
4. Роль снежных лавин в питании горных ледников / А.С. Турчанинова, Е.И. Башкова, А.В. Лазарев, Д.А. Петраков // Материалы международной конференции «Дистанционные и наземные исследования Земли в Центральной Азии». Бишкек: МоЮР, 2019. С. 219–224.
5. СП 116.13330.2012 «СНиП 22-02-2003 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения».

6. СП 47.13330.2016 «СНиП 11-02-96 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения».
7. Assessment of different topographic corrections in AWiFS satellite imagery of Himalaya terrain / V.D. Mishra, J.K. Sharma, K.K. Singh, N.K. Thakur, M. Kumar // Hydrology and Earth System Sciences. 2009. No. 118. P. 11–26.
8. Fast and effective feature-preserving mesh denoising / X. Sun, P. Rosin, R. Martin, F. Langbein // IEEE Trans Vis Comput Graph. 2007. Vol. 13. P. 925–938.
9. Greuell W., de Wildt M.D. Anisotropic reflection by melting glacier ice: Measurements and parameterizations in Landsat TM bands 2 and 4 // Remote Sensing of Environment. 1999. No. 70(3). P. 265–277.
10. Кнап W., Oerlemans J., Reijmer C. Narrowband to broadband conversion of Landsat TM glacier albedo // International Journal of Remote Sensing. 1999. P. 20.
11. Reijmer C., Bintanja R., Greuell W. Surface albedo measurements over snow and blue ice in thematic mapper bands 2 and 4 in Dronning Maud Land, Antarctica // Journal of Geophysical Research. 2001. P. 106.
12. An open-source JavaScript library for mobile-friendly interactive maps [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://leafletjs.com/> (дата обращения: 02.11.2019).
13. Landsat Science Products [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-surface-reflectance/> (дата обращения: 02.11.2019).