

МОНИТОРИНГ ГОРНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ КАК ИНДИКАТОРА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

О.О. Рыбак^{*}, *Е.А. Рыбак*^{**}

^{*}Филиал Института
природно-технических систем,
г. Сочи, Курортный проспект, 99/18
^{**}Сочинский научно-исследовательский
центр РАН, г. Сочи, ул. Театральная, д. 8а
E-mail: Elena.Rybak@gmail.com

Площадь и объем горных ледников неуклонно сокращаются в течение последних полутора сотен лет. Характеристики горного оледенения в значительной степени определяются приземной температурой воздуха. В связи с этим они могут служить индикатором глобальных климатических изменений.

Введение. Горные ледники, по-видимому, наиболее уязвимая часть криосферы с точки зрения реакции на изменение климатических условий. Горные системы занимают около 20% территории суши и непосредственно дают средства к существованию примерно 10% населения мира, а косвенным образом влияют на жизненные условия половины населения земного шара [1]. Ледники встречаются практически на всех континентах земного шара (за исключением Австралии, но они представляют неотъемлемую часть ландшафтов Новой Зеландии).

Колебания площади, занятой ледниками, непосредственно влияет на состояние экосистем и экономику горных регионов. Контроль за поведением ледников, регулярные наблюдения, математическое моделирование и прогноз их динамики чрезвычайно актуальны в силу потенциальных катастрофических последствий быстрых изменений их состояния.

В настоящее время на Земле насчитывается более 160 тыс. ледников, при этом годовые или многолетние балансы массы в разные периоды времени были рассчитаны менее чем для 300 [2]. Международ-

ная координация за систематическими наблюдениями за горными ледниками началась в 1894 г. с учреждением Международной гляциологической комиссии. Объем наблюдений колебался от года к году. Накопленный более чем за столетие упорядоченный материал наблюдений позволил обобщить исходные данные, оценить масштабы изменений горного оледенения, особенности этих изменений в различных географических регионах и связь с глобальными колебаниями климата, проявляющихся, прежде всего, в росте глобальной приземной температуры воздуха.

1. Глобальные климатические изменения. Отличительная черта современных изменений климата состоит в беспрецедентной скорости потепления и в их пространственной и временной неоднородности. Характер влияния климатических изменений на экономику и окружающую среду варьируется от региона к региону.

Последний оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) конкретизирует выводы, касающиеся величин будущих изменений климатических характеристик [3]. В докладе МГЭИК используется понятие репрезентативных траекторий концентраций (РТК). Каждая РТК, соответствующая той или иной гипотетической траектории развития мировой экономики, определяется приближительной суммарной величиной радиационного воздействия на климатическую систему Земли в 2100 г. по сравнению с 1750 г. Экспертами был определен набор из четырех РТК: 2,6 Вт/м² (РТК2.6), 4,5 Вт/м² (РТК4.5), 6,0 Вт/м² (РТК6.0) и 8,5 Вт/м² (РТК8.5). Эти четыре РТК включают один сценарий сокращения выбросов ПГ, который предполагает весьма низкий уровень воздействия на климатическую систему (РТК2.6); два сценария стабилизации выбросов (РТК4.5 и РТК6.0) и один сценарий с весьма высокими уровнями выбросов ПГ (РТК8.5). Согласно РТК6.0 и РТК8.5, радиационное воздействие не достигает мак-

симального значения к 2100 г.; в РТК2.6 оно достигает максимума, а затем снижается; в РТК4.5 оно стабилизируется к 2100 г.

К концу 21-го века рост глобальной приземной температуры, вероятно, превысит $1,5^{\circ}\text{C}$ по сравнению с периодом 1850 – 1900 гг. во всех сценариях РТК, кроме РТК2.6. При реализации сценариев РТК6.0 и РТК8.5, рост, вероятно, превысит 2°C . Потепление будет продолжаться и после 2100 г. согласно всем сценариям, кроме РТК2.6. Со средней степенью достоверности рост превысит 4°C в соответствии с РТК8.5.

2. Связь между климатическими изменениями и состоянием горного оледенения. Если будущие климатические изменения оцениваются, исходя из результатов численных расчетов на моделях общей циркуляции атмосферы и океана, то недавние и текущие климатические изменения на глобальном и региональном уровнях реконструируются на основе инструментальных наблюдений. Последние, однако, доступны далеко не всегда, и оценить их можно по различным косвенным данным.

На повсеместное отступление ледников по всему миру в предшествующие десятилетия часто ссылаются как на четкий и однозначный индикатор глобального потепления [2]. В последнее время качество гляциометеорологических полевых наблюдений и модельных исследований существенно улучшилось, что позволяет лучше понять связь между процессами в климатической системе и балансом массы ледников [4]. По сравнению с другими индикаторами климатических изменений (например, годовыми кольцами деревьев), отклик горно-ледниковых систем (геометрических характеристик) на вариации климата носит гораздо более простой характер [4]. Проблема заключается в том, что длительные непрерывные ряды наблюдений существуют лишь для немногочисленных горных ледников по всему миру (например, Storglaciären в Швеции – около 60 лет, Джанкуат, Центральный Кавказ, Россия – около 50 лет). Суще-

ствуют неинструментальные методы восстановления длины ледников по разнообразным косвенным данным, однако, последние также весьма немногочисленны. Тем не менее, даже относительно небольшое количество длительных записей позволяет провести анализ климатических изменений. В частности, Урлеманс [4] предложил достаточно простой и эффективный метод оценки, использующий информацию об изменениях длины ледников. Баланс массы ледника зависит, прежде всего, от температуры воздуха, солнечной радиации и количества осадков. Экспериментально было доказано, что основной причиной таяния является солнечная радиация, однако флуктуации баланса массы определяются, в основном, колебаниями температуры воздуха и осадков [5]. На основе анализа многочисленных данных математического моделирования и принимая во внимание гораздо меньшую пространственно-временную изменчивость поля осадков по сравнению с полем температуры, Урлеманс пришел к выводу, что вариации характеристик горного оледенения в масштабах десятилетий зависят от температуры воздуха. Длина ледника определяется из уравнения

$$\frac{dL'(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} [cT'(t) + L'(t)], \quad (1)$$

где t – время, чувствительность климата; L' – отклонение текущей длины ледника от условной точки отсчета; T' – среднегодовое отклонение приземной температуры воздуха от условно-репрезентативного значения; c – сокращение условно равновесной длины ледника при увеличении температуры воздуха на 1°K ; τ – параметр задержки (время отклика). Решая относительно T' , получим:

$$T'(t) = -\frac{1}{c} \left[L'(t) + \tau \frac{dL'(t)}{dt} \right]. \quad (2)$$

Таким образом, имея ряд длины ледника и зная значения параметров c и τ , можно реконструировать ряд температуры воздуха. Последние Урлеманс определяет, исходя из простой теории динамики лед-

ников и серии численных экспериментов. В результате анализа 169 рядов, было установлено, что s меняется в пределах от 1 до 10 км °K⁻¹, а значения τ , зависящие, в основном, от геометрии и размера конкретного ледника, находятся в пределах 40–100 лет. Полученные в результате расчетов, оценки роста глобальной температуры воздуха хорошо согласуются с инструментальными данными. Несмотря на значительные неопределенности ключевых параметров, и, вследствие этого необходимостью применения статистических методов при расчетах, описанный выше простой подход для использования характеристик горного оледенения в качестве индикатора для определения роста глобальной температуры показал свою состоятельность.

3. Мониторинг состояния горного оледенения. Что, собственно, понимается под мониторингом горного оледенения? Остановимся на наиболее распространенных его видах. Наиболее простым показателем, характеризующим изменения ледника, будет его длина, о которой речь шла в предыдущем разделе. Простое регулярное измерение положения кромки ледника (непосредственно в поле или дистанционными методами) дает ценные первичные сведения о его состоянии. Подробную информацию о балансе массы ледника дают полевые измерения аккумуляции и абляции, до сих пор получаемые традиционным способом снятия показаний в речной сети. Этот метод достаточно затратен во всех отношениях, так как требует соответствующего оборудования, квалифицированных специалистов, расходов на экспедиционную работу (рис. 1). Измерение толщины льда (рис. 2), необходимое для построения математических моделей динамики ледников, также требует значительных вложений. В последние годы были сделаны первые шаги в применении беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для измерения высоты поверхности ледников (рис. 3). БПЛА позволяют

относительно очень быстро получать как карты территории с большим пространственным разрешением, а, в перспективе, также и информацию о внутреннем строении ледников.



Р и с. 1. Установка абляционной рейки на леднике Перс (Pers), массив Бернина, Швейцария (фото О.О. Рыбака, 2014 г.)

Сравнение, после соответствующей дешифровки, снимков (карт), полученных в разное время дает очень подробную информацию о динамике ледника. Заметим, что и такая информация во многих случаях будет неполной и потребует дополнительных исследований из-того, что отдельные участки ледников могут быть погребены под слоем осыпного материала. Однако даже с учетом достаточно высокой стоимости БПЛА и затрат на проведение полевых работ этот вид мониторинга за состоянием горного оледенения представляется одним из наиболее перспективных. Внедрение дистанционных методов важно еще по одной причине – несмотря на очевидную важность мониторинга горного оледенения, в конце 20-го столетия произошло резкое сокращение гляциологических наблюдений по всему миру [4].



Р и с. 2. Измерение толщины льда точечным радаром и попутное определение координат с помощью спутниковой системы глобального позиционирования; ледник Гарабаши, Центральный Кавказ, Россия (фото Р. Нуубреchts, 2015 г.)



Р и с. 3. Испытание БПЛА над ледником Перс (Pers), массив Бернина, Швейцария (фото О.О. Рыбака, 2014 г.).

Заключение. В условиях изменяющегося климата тенденция к сокращению горного оледенения по всему миру, вероятно, сохранится. Надежные прогностические оценки эволюции горных ледников невозможны без применения математических моделей, а также исследований регионального климата и собственно динамики горных ледников. В последние несколько десятилетий модели горных ледников достаточно быстро эволюционируют: они постоянно совершенствуются и усложняются, что обусловлено как развитием теории и методов моделирования, так и ростом производительности вычислительной техники. Решение обратной задачи – оценки текущих и прошлых климатических изменений, особенно на региональном уровне в горных регионах может быть решена с использованием данных о современном состоянии горного оледенения. Для этого настоятельно необходимо продолжать мониторинг тех ледников, где имеются длительные ряды наблюдений, а также расширять применение дистанционных методов (анализ космических снимков, аэрофотосъемка, использование БПЛА). Дистанционные методы дают возможность альтернативной оценки региональных климатических изменений там, где по каким-либо причинам отсутствуют инструментальные наблюдения. Комбинирование дистанционных методов и математического моделирования представляется наиболее перспективным направлением в мониторинге горного оледенения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Beniston M., Haeberli W.* Sensitivity of Mountain Regions to Climatic Change. In: “Climate of the 21st Century: Changes and Risks. Scientific Facts” (eds. Lozán, J. et al), – Wissenschaftlichen Auswertungen, Hambudg, Germany, 2001, pp. 237–244.
2. *Dyurgerov M., Meier M.F.* Glaciers and the study of climate and sea-level change. In: “Mass Balance of the Cryosphere: Observations and Modelling of Contemporary and Future Changes” (eds. J.L. Bamber and A.J. Payne), – Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2003, pp. 579–621.
3. *Изменение климата, 2013 г.* Резюме для политиков. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (ред. Стоккер Т.Ф., Цинь Д., Платтнер Дж.-К., Тигнор М., Аллен С.К., Бошунг Дж., Науэлс А., Ся Ю., Бекс В., Мидглей П.М.), – Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, US, 45 с.
4. *Oerlemans J.* Extracting a Climate Signal from 169 Glacier Records // *Science*. 2005. V. 308. P. 675–677.
5. *Oerlemans J.* Glacio-meteorological investigations on Vatnajökull, Iceland, summer 1996: an overview / J. Oerlemans, H. Björnsson, M.H. Kuhn [et al] // *Boundary-layer meteorology*. – 1999. – V. 92. – P. 3–26.