

УДК 55.556

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ЛЕДОВЫХ РЕСУРСОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА⁴

Федоров В.М., Залиханов А.М.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
Москва, Российская Федерация, e-mail: fedorov.msu@mail.ru

По данным астрономических эфемерид рассчитывались значения приходящей на верхнюю границу атмосферы Земли солнечной радиации. Проводилось сравнение значений суммарного баланса массы ледника Джанкуат с рассчитанными значениями солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы за год в северное полушарие, а также с разностью солнечной радиации, поступающей в экваториальную и полярную область северного полушария Земли (инсоляционной контрастностью). На основе рассчитанных значений приходящей солнечной радиации по уравнениям регрессии были рассчитаны значения суммарного баланса массы для ледника Джанкуат на период с 1850 по 2050 гг.

Проведенное на основе корреляционного анализа сравнение показало, что тенденция сокращения массы льда ледника Джанкуат определяется эффектом усиления межширотного теплообмена, что подтверждается, во-первых, тесной отрицательной связью суммарного баланса массы с разностью солнечной радиации приходящей в экваториальную и полярную область северного полушария. Во-вторых, высокой отрицательной связью суммарного баланса массы с изменением продолжительности меридиональной южной циркуляции.

Тенденция изменения массы ледника Джанкуат на продолжительных временных интервалах (десятки – первые сотни лет) определяется, главным образом, радиационным фактором. На менее продолжительных интервалах времени (годы – первые десятки лет) многолетняя тенденция существенно нарушается влиянием циркуляционных факторов.

Ключевые слова: горные ледники, Кавказ, солнечная радиация, циркуляционные процессы, баланс массы льда, корреляция, уравнение регрессии, тенденции изменения.

Введение

Многолетние изменения массы льда в ледниковых районах Земли связаны, прежде всего, с изменением глобальной температуры, являющейся одним из основных показателей изменяющегося климата. Наиболее важным в проблеме исследования и прогнозирования изменений климата является вопрос о причинах, вызывающих эти изменения (Кондратьев, 1987; Монин, 1982; Монин, Шишков, 1979, 2000). В XX веке отмечена тенденция повышения глобальной приповерхностной температуры, однако причины этого однозначно не определены. Широко распространено мнение, о том, что основной причиной изменения глобального климата является «парниковый» эффект, связываемый, главным образом, с эмиссией парниковых газов, определяемой антропогенным фактором (http://www.wmo.int/pages/index_ru.html). В то же время, не подвергается сомнению то, что солнечная радиация, поставляющая на Землю свет и тепло, имеет важнейшее значение в генезисе климата (Монин, Шишков, 1979, 2000). «Солнце – единственный источник тепла, достаточно сильный для того, чтобы оказывать значительное влияние на температуру поверхности земли и воздуха» (Воейков, 1948, с. 166).

Циркуляционные процессы в атмосфере вносят существенные изменения в годовой, сезонный и суточный ход изменения температуры воздуха, который определяется, поступающей от Солнца энергией. Они существенно деформируют, связанную с приходящей солнечной радиацией суточную, сезонную и годовую

⁴ Работа выполнена в рамках госбюджетной темы и при финансовой поддержке РФФИ, проекты 15-05-07590, 15-29-06967.

периодичность в изменении температурного режима. С циркуляционными процессами в атмосфере связано образование и распространение атмосферных осадков. Таким образом, циркуляционные процессы влияют на ход основных климатических показателей, определяющих условия развития ледников и в связи с этим представляются (наряду с приходящей от Солнца энергией), важнейшим фактором как распространения ледников в пространстве, так и их развития во времени. Нами поставлена задача по исследованию и оценке изменения ледовых ресурсов Центрального Кавказа в связи с приходящей на верхнюю границу атмосферы (ВГА) солнечной радиацией и циркуляционными процессами в атмосфере в многолетнем режиме. В качестве оценки ледовых ресурсов принимался суммарный баланс массы репрезентативного для Центрального Кавказа ледника Джанкуат, для которого получен продолжительный ряд балансовых наблюдений.

С широтными особенностями распределения солнечной радиации связано расположение климатических поясов (широтная зональность). Климатические условия Кавказа определяются его положением на границе двух широтных поясов – умеренного и субтропического, с чем связаны особенности радиационного режима и циркуляции атмосферы. Ледник Джанкуат расположен на северном макросклоне Главного Кавказского хребта в верховьях долины Адылсу, правого притока реки Баксан. Детальные исследования на леднике Джанкуат начаты в 1965 году, с 1968 года на леднике ведутся непрерывные балансовые наблюдения (Ледник Джанкуат, 1978; Поповнин, Петраков, 2005). С этого времени для ледника (одного из десяти эталонных ледников Земли) получен наиболее продолжительный в России ряд инструментальных балансовых показателей, что и определило выбор ледника Джанкуат в качестве объекта наших исследований. Кроме этого, выполнены реконструкции изменения суммарного баланса массы льда (Дюргеров, Поповнин, 1980; Федоров, 2011), что увеличивает продолжительность балансовых рядов и, создает возможности для анализа причин изменения массы льда на леднике Джанкуат в более широком временном диапазоне. Так же для ледника получены хронологические датировки некоторых конечных морен, что позволяет проводить оценку реконструкции баланса массы этого ледника (Золотарев, 1999; Алейникова, 2001).

Результаты реконструкции суммарного баланса и инструментальных балансовых наблюдений и данные выполненных на их основе реконструкции (по макроциркуляционной модели) суммарного баланса массы ледника сопоставляются в работе с рассчитанными значениями приходящей на ВГА в северное полушарие Земли солнечной радиации.

Методика исследований

В методике исследований применялись расчеты приходящей на ВГА солнечной радиации и расчеты весовых коэффициентов элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) с использованием типизации циркуляционных процессов в атмосфере (Кононова, 2009) для реконструкции суммарного баланса массы ледника Джанкуат.

Расчет инсоляции Земли

Расчеты приходящей на ВГА Земли солнечной радиации известны начиная с работ М. Миланковича (Миланкович, 1939). Они проводились с учетом трех параметров орбитального движения Земли (эксцентриситет земной орбиты, наклон оси вращения Земли и долгота перигелия) на длительные периоды времени (сотни тыс. лет). Расчеты выполнялись только для отдельных широт. Принималось, что Земля имеет форму сферы. В расчетах, таким образом, принимались во внимание только вековые вариации изменения характеристик орбитального движения Земли и,

связанные с ними вариации в поступлении к Земле солнечной радиации. Периодические вариации элементов земной орбиты и наклона оси вращения Земли при этом не учитывались. Разрешение по времени при расчетах Миланковича и его последователей (Шараф, Будникова, 1968; Монин, 1982) составляло от 1 до 5 тысяч лет. Иными словами, для отдельной широты (например, 65 градусов северной широты) для каждых суток определенного года рассчитывалось поступление приходящей солнечной радиации. Затем совершая шаг в 1 или 5 тыс. лет в прошлое (отступая на 1 или 5 тыс. лет назад) снова производились расчеты для каждых суток этого года (отстоящего на 1 или 5 тыс. лет от предыдущего) с учетом изменения эксцентриситета, наклона оси и долготы перигелия. Таким последовательными итерациями производились расчеты приходящей на ВГА Земли солнечной радиации для определенной географической широты на длительные периоды времени. При расчетах с таким большим разрешением по времени отдельные годы внутри интервалов продолжительностью в 1 или 5 тыс. лет оказывались неопределенными в отношении приходящей солнечной радиации. Выполняемые таким способом расчеты могли быть полезными при анализе палеоклиматических изменений, но для анализа современного климата расчеты с разрешением по времени в 1–5 тыс. лет привлечены быть не могут.

Расчеты, учитывающие периодические возмущения элементов земной орбиты и, связанных с ними высокочастотных вариаций солнечной радиации, были начаты в Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова, в России (Vorisenkov et al., 1983, 1985). Однако дальнейшего развития эти исследования не получили. Исследования высокочастотных вариаций инсоляции также были начаты и проводятся в институте астрономии и геофизики имени Г. Леметра, Бельгия (Bertrand et al., 2002 а, б). Расчеты инсоляции (на основе решения задачи о движении 2-х тел) в этом диапазоне были выполнены в Институте криосферы Земли (Тюмень) И.И. Смутьским и О.И. Кротовым (Смутьский, Кротов, 2013).

Расчеты инсоляции в диапазоне высокочастотных вариаций также были выполнены в МГУ имени М.В. Ломоносова, автором совместно с А.А. Костиным (<http://www.solar-climate.com>). Расчеты приходящей солнечной радиации выполнялись по данным астрономических эфемерид (Giorgini et al., 1996; <http://ssd.jpl.nasa.gov>) для всей поверхности Земли (без учета атмосферы) в интервале с 3000 г. до н.э. по 2999 г. н.э. Исходными астрономическими данными для расчетов инсоляции были склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего (среднего солнечного) и всемирного корректируемого времени (истинного солнечного). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 – Geodetic Reference System, 1980) с длинами полуосей равными 6378137 м (большие) и 6356752 м (малая). В общем виде алгоритм расчетов можно представить выражением:

$$I_{nm}(\varphi_1, \varphi_2) = \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma(H, \varphi) \left(\int_{-\pi}^{\pi} \Lambda(H, t, \varphi, \alpha) d\alpha \right) d\varphi \right) dt, \quad (1)$$

где I – приходящая солнечная радиация за элементарный n -й фрагмент m -го тропического года (Дж); σ – площадной множитель (м^2), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал $\sigma(H, \varphi) d\alpha d\varphi$ – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида; α – часовой угол, φ – географическая широта, выраженные в радианах; H – высота поверхности эллипсоида относительно поверхности Земли (м); $\Lambda(H, \varphi, t, \alpha)$ – инсоляция в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида ($\text{Вт}/\text{м}^2$), t – время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе 1° , по широте 1° , по времени $1/360$ часть продолжительности тропического года (Fedorov, 2015, 2018). Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным $1361 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (Kopp, Lean, 2011). Изменение активности Солнца не учитывалось. Подробно методика выполненных расчетов

приходящей на эллипсоид Земли (без учета атмосферы) солнечной энергии изложена на электронном ресурсе «Солнечная радиация и климат Земли» (<http://www.solar-climate.com>).

Основные отличия нашего подхода (по времени, пространству и исходным данным) от известных (из астрономической теории климата) расчетов низкочастотных вариаций инсоляции заключаются в следующем.

1) М. Миланкович и его последователи рассчитывали инсоляцию Земли (без учета атмосферы) на длительные периоды времени (от нескольких сотен до миллионов лет) с учетом только ее вековых вариаций связанных с изменением эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси вращения Земли (с периодами в несколько десятков тысяч лет). Разрешение по времени в расчетах составляло приблизительно от 5 000 лет в расчетах М. Миланковича (Миланкович, 1939), Ш. Шараф и Н. Будниковой (Шараф, Будникова, 1968), С.А. Мони́на (Монин, 1982) до 1000 лет в работах А. Вернекара (Vernekar, 1972), А. Берже (Berger, 1978 а, б; Berger, Loutre, 1992; e-mail сообщение M.F. Loutre, 2016). М. Миланкович и его последователи рассчитывали суточную и годовую инсоляцию на некоторый начальный год (например, 1850 или 1950 год). Затем совершался шаг (от 1000 до 5000 лет) в прошлое (или в будущее) и процедура расчетов (с учетом изменения эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси) повторялась. Периодические вариации инсоляции не учитывались (продолжительность тропического года принималась постоянной). Разрешение по времени в расчетах И.И. Смульского и О.И. Кротова составляло 1 год (расчеты проводились на суперкомпьютере). В наших расчетах учитывались вековые и периодические вариации (расстояния Земля – Солнце, продолжительности тропического года, наклона оси вращения и т. д.). Разрешение по времени при интегрировании составляло 1/360 часть продолжительности тропического года (приблизительно сутки), с учетом вариаций этой продолжительности.

2) М. Миланковичем и всеми его последователями расчеты выполнялись для отдельных географических широт (параллелей), принималось, что Земля имеет форму сферы. В наших расчетах инсоляция рассчитывалась для всей земной поверхности аппроксимируемой эллипсоидом. Разрешение по пространству при интегрировании составляло по долготе 1° , по широте 1° .

3) Для выполнения расчетов М. Миланковичем (точнее В. Мишковичем) на длительный период были рассчитаны астрономические эфемериды для эксцентриситета, долготы перигелия и наклона оси вращения Земли, которые в дальнейшем уточнялись его последователями (Brouwer, Van Woerkom, 1959; Шараф, Будникова, 1969; Vernekar, 1972; Berger, 1978 а, б; Bretagnon, 1982). И.И. Смульский и О.И. Кротов проводили расчеты на основе решения задачи 2-х тел (т.е. с рядом ограничений в исходных астрономических данных). Нами для расчетов инсоляции использовались приведенные в формуле (1) параметры, учитывающие вековые и периодические вариации элементов орбиты Земли и оси ее вращения. В качестве исходных данных для расчетов использовались высокоточные астрономические эфемериды, рассчитанных в Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института (период от 3000 лет до н.э. до 3000 лет н.э.) и размещенные на электронном ресурсе NASA (<http://ssd.jpl.nasa.gov>).

Отличия нашего подхода в анализе высокочастотных вариаций инсоляции от методов Е. П. Борисенкова, M.F. Loutre, A. L. Bertrand и их коллег связаны, во-первых, с исходными астрономическими данными, используемыми в расчетах. Во-вторых, с различным решением расчетов инсоляции относительно поверхности Земли. В-третьих, по временному интервалу, охваченному расчетами. В качестве исходных данных Борисенковым с коллегами использовались эфемериды, рассчитанные в Институте теоретической астрономии Академии наук СССР (e-mail сообщение А.В. Цветкова, 2015). Исходными данными для расчетов, выполненных бельгийскими

исследователями (Bertrand et al., 2002 а, б; Loutre et al., 1992) были эфемериды VSOP82 (Bretagnon, 1982). В наших расчетах использовались высокоточные JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE-405/406 (Standish, 1982; <http://ssd.jpl.nasa.gov>) разработанные в Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института.

Поверхность Земли при расчетах инсоляции отождествлялась нашими предшественниками со сферой и, расчеты выполнялись только для отдельных широт этой сферы. Е.П. Борисенковым с коллегами (Borisenkov et al., 1983; 1985) получены значения только для 20° , 40° , 60° и 80° северной широты. В исследованиях бельгийских ученых (Loutre et al., 1992) расчеты выполнялись (на середину июля, точнее для точки с геоцентрической долготой равной 120°) только для 65° северной широты, для точек равноденствия и солнцестояния – для экватора и широт 30° , 60° и 90° в каждом полушарии. В работах С. Бертрана с коллегами (Bertrand et al., 2002 а, б) расчеты инсоляции охватывают предшествующее тысячелетие, они также относятся к июлю, и рассчитаны для широтной зоны 65° – 70° с. ш. При этом значения для широтной зоны рассчитывались осреднением значений, полученных для ограничивающих широтную зону параллелей 65° и 70° . В работе И.И. Смульского и О.И. Кротова расчеты выполнялись для параллелей 0° , 10° , 25° , 45° , 65° , 80° и 90° каждого полушария. В наших расчетах поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом и приходящая радиация рассчитывалась не на отдельные параллели (широты), а на всю поверхность Земли и поверхности отдельных широтных зон.

Разрешение по времени при расчетах высокочастотных вариаций инсоляции в работе Е.П. Борисенкова с коллегами приблизительно соответствуют суткам (Borisenkov et al., 1983). Однако выполненные ими расчеты представлены только для зимнего и летнего полугодий (и только для северного полушария) в интервале с 1800 по 2100 гг. В работе М.Ф. Loutre с коллегами (Loutre et al., 1992) расчеты проводились на интервале в 5000 лет (в прошлое) с годовым разрешением и только для июля (точнее отдельной точки с геоцентрической долготой 120°), точек равноденствия и солнцестояния. В работе С. Бертрана с коллегами (Bertrand et al., 2002 а, б) расчеты инсоляции охватывают предшествующее тысячелетие, но они относятся только к одному месяцу – июлю (выполнены с годовым разрешением). Кроме этого, значение солнечной постоянной в наших расчетах принималось равным 1361 Вт/м^2 (Kopp, Lean, 2011). В работах наших предшественников – 1368 Вт/м^2 (Bertrand et al., 2002 а, б), 1367 Вт/м^2 в работах Е.П. Борисенкова с коллегами [e-mail сообщение А.В. Цветкова, 2015] и М.Ф. Loutre с коллегами (Loutre et al., 1992), 1366 Вт/м^2 (Berger et al., 2010). И.И. Смульский и О.И. Кротов использовали тоже значение солнечной постоянной, что и М. Миланкович – $1395,6 \text{ Вт/м}^2$ (Смульский, Кротов, 2013).

Таким образом, в общем наши расчеты основаны на высокоточных эфемеридах, в них используется новое значение солнечной постоянной (1361 Вт/м^2), более детально охватывается временной интервал протяженностью в 5999 лет и вся поверхность Земли (рассчитанные данные приводятся в доступном архиве с разрешением в 5° широты для всей земной поверхности и в 1 астрономический месяц для каждого из 5999 лет по времени), земная поверхность в наших расчетах не отождествляется со сферой, а аппроксимируется эллипсоидом. Выполненные расчеты закрывают пространственные и временные «бреши» в расчетах инсоляции для периода 3000BC – 2999AD.

По результатам расчетов сформирована общедоступная база данных приходящей солнечной энергии во все широтные зоны Земли (протяженностью в 5 градусов) за каждый астрономический месяц каждого года для периода 3000BC – 2999AD (<http://www.solar-climate.com>). Представленные в массивах (в трех единицах размерности – Дж, Дж/м² и Вт/м²) данные используются авторами при дальнейшем анализе в данной работе. Эти данные также могли бы использоваться как входной

энергетический сигнал в радиационном блоке физико-математических моделей климата и при точных расчетах радиационного баланса Земли.

Проводилось сравнение значений суммарного баланса массы ледника Джанкуат с рассчитанными значениями солнечной радиации, приходящей на ВГА за год в северное полушарие, а также с разностью солнечной радиации, поступающей в экваториальную и полярную область северного полушария (рис. 1).

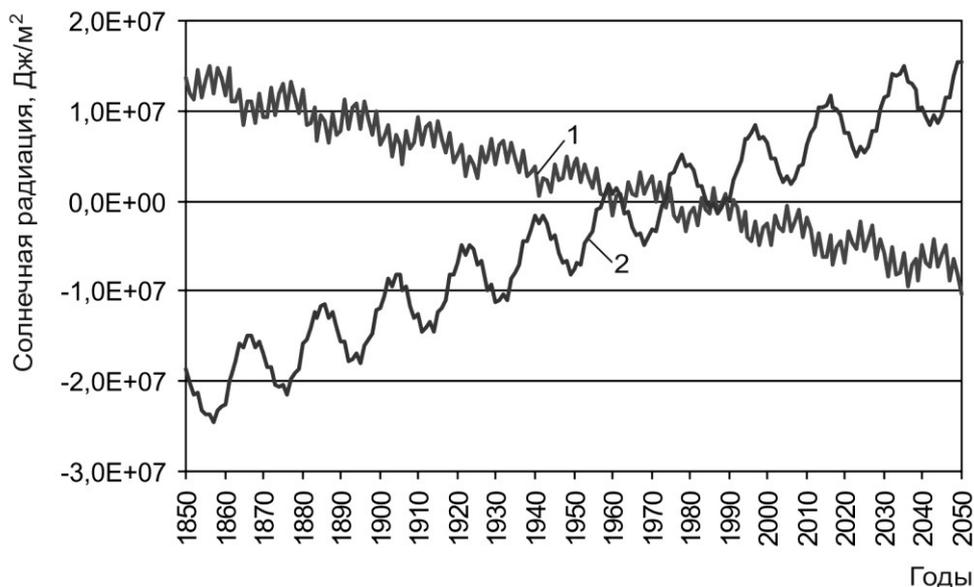


Рис. 1. Изменение приходящей на эллипсоид Земли (без учета атмосферы) солнечной радиации (1) и разности радиации (2) приходящей в экваториальную и полярные области Земли (относительно средних для периода 1961 – 1990 гг. значений), Дж/м².

Типизация циркуляционных процессов

Выполнено сравнение значений суммарного баланса массы с продолжительностью действия групп циркуляции – меридиональной южной (МЮ) и нарушения зональности (НЗ). Ранее было доказано участие продолжительности этих типов циркуляции в динамике баланса массы ледников северного полушария. На этой основе разработана методика реконструкции баланса массы ледника Джанкуат (Федоров, 2009, 2011).

Схемы типизации атмосферных процессов представляют непрерывный процесс общей циркуляции атмосферы в виде чередования устойчивых многократно повторяющихся фрагментов – однородных процессов (охватывающих полушарие или значительные по площади регионы). Наибольшую известность в отечественной метеорологии получили типизации макромасштабных атмосферных процессов Г. Я. Вангенгейма – А.А. Гирса (Гирс. 1974) и Б.Л. Дзердзеевского, В.М. Курганской, З.М. Витвицкой (Дзердзеевский и др., 1946). В связи с четкостью формализации циркуляционных ситуаций, широкой пространственной и временной информативностью (разработана для всего северного полушария, охватывает период с 1899 года по настоящее время), общей доступностью Календаря последовательной смены элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) (Кононова, 2003, 2009; <http://www.atmospheric-circulation.ru>), в данной работе используется типизация Б.Л. Дзердзеевского, В.М. Курганской, З.М. Витвицкой.

В качестве профилирующего признака в этой типизации принято соотношение зональной и меридиональной составляющих циркуляции над полушарием. Выделяется 13 основных типов ЭЦМ, а с учетом их разновидностей (выделяемых на основе

сезонных или региональных различий) – 41 ЭЦМ. По характеру соотношения зонального и меридионального переносов во внетропических широтах северного полушария ЭЦМ объединены в четыре группы: зональную, нарушения зональности, меридиональную северную и меридиональную южную. Группы зональная и нарушения зональности отражают зональный перенос в атмосфере, группы меридиональная южная и меридиональная северная – меридиональный перенос воздушных масс.

Таким образом, в непрерывном циркуляционном процессе в атмосфере выделяются элементарные циркуляционные механизмы, группы циркуляции и циркуляционные сезоны, являющиеся основными структурными элементами рассматриваемой типизации. Время, частота проявления и продолжительность действия тех или иных ЭЦМ отражают особенности общей циркуляции атмосферы, определяют характер погоды каждого конкретного места. Продолжительность действия групп циркуляции, характер соотношения зональных и меридиональных форм циркуляции являются важнейшими макроциркуляционными характеристиками климата при рассмотрении его многолетних изменений. Применение типизации к анализу балансовых показателей ледников позволило разработать методику реконструкции баланса массы и увеличить продолжительность балансовых рядов. Основу методики реконструкции составили представления о расчете весовых коэффициентов отдельных ЭЦМ в процессах аккумуляции и абляции на леднике, охваченном балансовыми наблюдениями (Федоров, 2011).

Связь циркуляционных характеристик климата находилась из предположения о том, что каждому элементарному циркуляционному процессу на полушарии соответствуют определенные погодные условия в конкретном месте (температурный режим и режим атмосферных осадков), которые определяют развитие ледников. Связь циркуляционных характеристик (продолжительность действия ЭЦМ) с балансовыми показателями была найдена в виде пропорции циркуляционного вклада (весовых соотношений) каждого ЭЦМ в формирование знака и величины аномалии балансового показателя (Федоров, 2007, 2009, 2011).

Пропорция вклада (весов) для рядов инструментальных наблюдений аккумуляции и абляции определялась следующим образом. Из ряда значений балансового показателя вычиталось среднее многолетнее значение. В результате была получена знакопеременная функция – аномалия балансового показателя (аккумуляции, абляции). Далее, по данным Календаря последовательной смены ЭЦМ (Кононова, 2009; <http://www.atmospheric-circulation.ru>) для лет с положительными и отрицательными аномалиями отдельно находились суммарные значения продолжительности действия (в сутках) ЭЦМ всех типов за некоторый период года (например, зимний – для аккумуляции и летний – для абляции). Из предположения о том, что связанные с отдельными типами ЭЦМ погодные условия вносят определенный циркуляционный вклад в формирование как положительных, так и отрицательных аномалий годовых значений балансовых показателей ледника, были рассчитаны (в долях единицы) пропорции циркуляционного вклада (веса) каждого ЭЦМ в формирование знака и величины аномалии аккумуляции и абляции. Полученные пропорции проверялись восстановлением значений исходных инструментальных рядов. Для этого по Календарю последовательной смены ЭЦМ рассчитывалась выборка по продолжительности действия каждого ЭЦМ за расчетный период. Затем на основе пропорции циркуляционного вклада («ключа») определялся вклад каждого ЭЦМ в отклонение от среднего многолетнего значения аккумуляции и абляции и рассчитывается суммарное значение циркуляционного вклада ЭЦМ всех типов. На основании предположения, что суммарная по модулю (за анализируемый период) аномалия вкладов ЭЦМ соответствует суммарной по модулю аномалии балансового показателя, были рассчитаны коэффициенты пропорциональности между ними.

Умножением значений суммарных вкладов ЭЦМ на коэффициент пропорциональности были получены восстановленные, на основе пропорции вклада, значения годовых отклонений балансовых показателей от среднего многолетнего (в мм в.э.) и далее алгебраическим сложением со средним многолетним значением – величины аккумуляции, абляции и затем баланса массы.

В качестве оценочных характеристик при этом принимались коэффициент корреляции между восстановленным и исходным рядами и расхождение между этими рядами в миллиметрах водного эквивалента и в процентах от среднего модуля аномалии исходного ряда. Статистическая значимость коэффициента корреляции определялась в соответствии с существующими методиками (Цымбаленко и др., 2007).

Изменением даты начала и продолжительности периода (аккумуляции, абляции) путем перебора находилось такое его значение, при котором величина коэффициента корреляции была максимальной, а расхождение – минимальным. Восстановленный ряд принимался за макроциркуляционную модель балансового показателя.

Алгоритм расчета пропорции, восстановления ряда и поиска периодов аккумуляции и абляции с оптимальными значениями оценочных характеристик был формализован в компьютерной программе, при этом были реализованы следующие возможности:

а) Автоматический поиск периодов аккумуляции и абляции с максимальными значениями коэффициента корреляции между модельными рядами и рядами инструментальных наблюдений и минимальными значениями расхождения.

б) Представление периодов аккумуляции и абляции в календарных датах или в процентах продолжительности циркуляционных сезонов (от даты их начала). Следствием этого стала возможность создания двух модельных модификаций: «календарной» и «сезонной». Величина шага (разрешения) в календарных моделях составляла 1 сутки, в сезонных моделях – 5% продолжительности циркуляционного сезона (то есть, приблизительно в 2–3 раза больше, чем в календарных).

в) Непосредственный учет величины аномалии исходного ряда (ряда инструментальных наблюдений).

г) Анализ фрагментов (полуинтервалов) исходного ряда на основе принципа корреляционной оптимальности.

Использование программы позволило обработать большие массивы климатологической и гляциологической информации, создать оптимальные модели реконструкции динамики балансовых показателей и получить новые статистически достоверные данные по динамике баланса массы ледников северного полушария в XX столетии (Федоров, 2006, 2007, 2011).

В результате разработки модели для нее были определены некоторые ограничения и погрешности.

1. Ограничение «окна». При использовании календарной модели реконструкции применяется определенный, строго фиксированный для каждого года период («окно») продолжительности аккумуляции и абляции, хотя реально сроки аккумуляции и абляции меняются от года к году. Используемый в модели реконструкции период продолжительности принимается по модели аппроксимации имеющей оптимальные оценочные критерии (коэффициент корреляции, расхождение рядов). При использовании сезонной модели период аккумуляции и абляции меняется год от года в соответствии с изменением сроков наступления циркуляционных сезонов и их продолжительностью.

2. Принимается, что при изменении порядка наступления, начала и продолжительности действия отдельных типов ЭЦМ в общем циркуляционном процессе пропорциональный вклад каждого ЭЦМ в отклонение параметра (аккумуляции, абляции) от среднего многолетнего на протяжении периода реконструкции для конкретного ледника существенно не меняется.

3. Допускается, что отклонения от среднего многолетнего значения балансовых показателей определяются полностью циркуляционными факторами и на основе линейной зависимости.

4. На тестируемом участке должны встречаться все ЭЦМ для определения их вклада (создания «ключа»). Иначе при реконструкции могут появиться «белые пятна».

5. Неизбежные ошибки модели связаны так же с пробелами в Календаре последовательной смены ЭЦМ. Так, отсутствуют данные за периоды с 10 по 31 декабря 1943 г. и с 7 по 10 марта 1946 г.

6. Возможные расхождения модели с реальностью определяются также вариациями отдельных типов ЭЦМ в пределах своей генерализованной схемы. Так, расположение центров и траекторий движений основных барических образований, их характеристики могут несколько отличаться при повторении одного и того же подтипа. Поэтому погодные условия так же могут несколько различаться для одних и тех же районов при повторении одних и тех же типов и подтипов ЭЦМ (Мацковский, Кононова, 2009).

Кроме того, расхождения могут определяться вариациями, заложенными в типизации для отдельных типов ЭЦМ (нечеткостью формализации некоторых ЭЦМ).

Надежность аппроксимации и реконструкции балансовых показателей также во многом определяется (Котляков и др., 1997; Глазырин и др., 1999) корректностью исходных данных (единая методика определения сезонных и годовых значений аккумуляции и абляции). На основе разработанной методики была выполнена реконструкция динамики балансовых показателей ледника Джанкуат (Федоров, 2006, 2007, 2011).

Результаты и их обсуждение

Исходными данными по суммарному балансу массы были ряды инструментальных наблюдений (с 1968 по 2007 гг.) и реконструированные на основе весовых коэффициентов ЭЦМ значения (с 1900 по 1967 гг.) По этим данным в динамике ледника выделяются два периода (Федоров, 2011). Первый (с 1900 по 1972 гг.) характеризуется сокращением массы льда. Среднее многолетнее значение баланса массы ледника составляет -328 мм в.э., аккумуляции – 2130 мм в.э., абляции – 2459 мм в.э. Корреляционная связь суммарного баланса массы ледника с балансовыми показателями высокая (0,739 – с аккумуляцией, 0,698 – с абляцией). На фоне общего сокращения массы льда в этот период отмечаются три непродолжительных этапа стационарного развития ледника: 1916 – 1921 гг., 1930 – 1935 гг. и 1951 – 1958 гг. Суммарное сокращение массы льда за этот период составляет 24,0 м в.э. Второй период (с 1973 – 2000 гг.) характеризуется стационарным состоянием ледника. Среднее многолетнее значение баланса массы льда в это время составляет -9,2 мм в.э., аккумуляции – 2443 мм в.э., абляции – 2452 мм в.э. Суммарный баланс массы ледника в этот период более тесно связан с аккумуляцией (0,828), чем с абляцией (0,650). Масса ледника в этот период практически не менялась. Существенное снижение темпов сокращения ледников Кавказа к началу XXI века прогнозировалось еще А.М. Залихановым и другими исследователями (Залиханов и др., 1984). Реконструкция отражает общую тенденцию деградации оледенения Центрального Кавказа и, в общем, согласуется с данными о непродолжительных наступаниях многих ледников Кавказа в периоды 1907 – 1914 гг. и 1927 – 1933 гг. (Голодковская, 1982; Гобеджашвили, 1989; Панов, 1993).

Очевидно, что состоятельность реконструкции определяется сопоставлением полученных результатов с имеющимися данными по эволюции ледника Джанкуат. Нами проведено такое сопоставление. По заключению Е.А. Золотарева (Золотарев,

1999) сокращение массы ледника приходится на период с 1880 г. по 1910 г., а в 1910 – 1920 гг. кривая баланса массы ледника должна приближалась к нулевому значению, соответствующему стационарному состоянию ледника. По данным нашей реконструкции в период с 1900 г. по 1915 г. отмечается сокращение массы льда, а период с 1916 г. по 1921 г. характеризуется как стационарный (Федоров, 2011). После этого, до 1930 г. по результатам реконструкции, продолжалось сокращение массы ледника Джанкуат, поэтому, в период с 1922 г. по 1930 г. вероятно образование конечной морены. Также, в соответствии с результатами реконструкции образование конечной морены, возможно, и в 30-е годы. Так, период с 1930 г. по 1935 г. согласно реконструкции соответствует стационарному состоянию ледника, что согласуется с фактом существования конечноморенного вала известного как «морена 30-го года» или «морена 30-х годов» (Орешникова, 1936; Турманина, 1971; Золотарев, Сейнова. 1985; Золотарев. 1999; Алейникова, 2001). С 1936 г. по 1950 г. по данным реконструкции масса ледника Джанкуат сокращается, а с 1951 г. по 1959 г. отмечается близкое к стационарному состояние ледника. Это согласуется с существованием моренного вала, датированного 1959 годом (Золотарев, 1999) или 1957 – 1958 гг. А.М. Алейникова на основании лихенометрических исследований датирует возраст морены 1958 годом (Алейникова, 2001). По данным М.Д. Докукина с 1959 г. отмечается активное отступление ледника (Докукин, 1985). Таким образом, реконструкция в целом хорошо согласуется с имеющимися данными по эволюции ледника Джанкуат в XX столетии, что позволяет использовать реконструированные значения суммарного баланса массы ледника Джанкуат в качестве исходных данных для анализа динамики баланса массы ледника в связи с приходящей на ВГА солнечной радиацией.

Корреляционный анализ проводился по вековым интервалам, начиная с 1900 – 1999 гг. с последовательным смещением векового «окна» на один год (1901 – 2000, 1902 – 2001 и т.д. до 1908 – 2007 гг., всего 9 вековых интервалов). Рассчитывались значения коэффициента корреляции (R) суммарного баланса массы с приходящей за год в северное полушарие (без учета атмосферы) солнечной радиации и с разностью солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную область северного полушария (инсоляционной контрастностью). Также рассчитывались значения R между суммарным балансом массы и продолжительностью групп циркуляции: нарушения зональности (НЗ) и меридиональной южной (МЮ). Полученные значения коэффициента корреляции представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Значения коэффициента корреляции суммарного баланса массы ледника Джанкуат с приходящей на ВГА солнечной радиацией и с продолжительностью групп циркуляции

Вековой интервал	Солнечная радиация		Группы циркуляции	
	Приходящая	Разность	НЗ	МЮ
1900 – 1999	0,851	-0,831	0,557	-0,702
1901 – 2000	0,855	-0,893	0,550	-0,709
1902 – 2001	0,855	-0,835	0,554	-0,718
1903 – 2002	0,853	-0,841	0,580	-0,723
1904 – 2003	0,860	-0,844	0,596	-0,728
1905 – 2004	0,859	-0,850	0,599	-0,731
1906 – 2005	0,859	-0,857	0,593	-0,737
1907 – 2006	0,870	-0,859	0,607	-0,738
1908 – 2007	0,868	-0,861	0,639	-0,737
Среднее	0,859	-0,852	0,586	-0,725
1900 – 2007	0,866	-0,849	0,618	-0,730

Отклонения значений R от среднего для интервала по модулю составляют для приходящей радиации $-0,57\%$, для разности $-1,57\%$. Отклонения значений R составляют для группы нарушения зональности $-3,91\%$, для группы меридиональной южной циркуляции $-1,43\%$.

Отмечается тесная и устойчивая (по вековым интервалам) связь суммарного баланса массы с приходящей солнечной радиацией и с межширотным градиентом солнечной радиации (инсоляционной контрастностью). Также отмечается заметная связь динамики суммарно баланса массы с продолжительностью групп циркуляции МЮ и НЗ. Отклик на вариации приходящей солнечной радиации и продолжительности НЗ для ледника Джанкуат положительный. Отклик на изменчивость разности солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную область и на продолжительность меридиональной южной циркуляции отрицательный. Таким образом, вековые тенденции сокращения суммарного баланса массы ледника Джанкуат могут являться следствием эффекта усиления межширотного теплообмена и, соответствующего увеличения продолжительности группы меридиональной южной циркуляции. Эффект усиления межширотного градиента приходящей солнечной радиации проявляется в увеличении продолжительности МЮ группы циркуляции (Федоров, Кононова, 2014). Этот эффект определяется вековой тенденцией увеличения инсоляции экваториальной области Земли и сокращением инсоляции ее полярных районов (увеличением меридионального градиента инсоляции или инсоляционной контрастности) и связан с вековым уменьшением наклона оси ее вращения (Федоров, 2018). Известно, что при увеличении угла наклона оси вращения увеличивается приход радиации в полярные районы, т.е. происходит сглаживание широтной контрастности в полушариях и усиление сезонных различий. При уменьшении угла наклона происходит увеличение радиации, поступающей в экваториальную область, и широтные контрасты возрастают, а сезонные различия сглаживаются (Миланкович, 1939; Монин, Шишков, 2000; Федоров, 2018). Этот эффект усиливает работу механизма теплообмена первого рода (Шулейкин, 1953).

С учетом более высоких значений коэффициента корреляции приходящей на ВГА за тропический год в северное полушарие солнечной радиации с суммарным балансом массы, были получены уравнения линейной и полиномиальной (полином второй степени) регрессии для расчета суммарного баланса массы ледника Джанкуат (рис. 2).

Полученные связи характеризуются достаточно высокими показателями аппроксимации (R^2 – коэффициент детерминации) – $0,751$ и $0,778$.

На основе рассчитанных значений приходящей солнечной радиации по полученным уравнениям регрессии были получены значения суммарного баланса массы ледника Джанкуат на период с 1850 по 2050 г. (рис. 3).

Среднегодовое расхождение исходных значений суммарного баланса массы и рассчитанных по уравнению линейной регрессии характеризуются значениями 3027 мм в.э., по полиномиальному уравнению – 2786 мм в.э. Это составляет $17,2\%$ и $15,8\%$ от средней по модулю величины суммарного баланса массы ледника для периода с 1900 г. по 2007 г. Коэффициент корреляции рассчитанных и фактических значений суммарного баланса характеризуется значением $0,866$ для значений, рассчитанных по уравнению линейной регрессии и, $0,881$ – для значений, рассчитанных по полиномиальному уравнению. Отмеченные расхождения могут определяться влиянием циркуляционных процессов на процессы аккумуляции и абляции (Федоров, 2011).

Отдельно исследовалась связь суммарного баланса массы с приходящей на ВГА солнечной радиации для рядов инструментальных балансовых наблюдений (без реконструированных данных). На относительно коротких рядах инструментальных наблюдений связь заметно нарушается влиянием других факторов (например, преобладающих типов атмосферной циркуляции), однако тенденция при этом сохраняется.

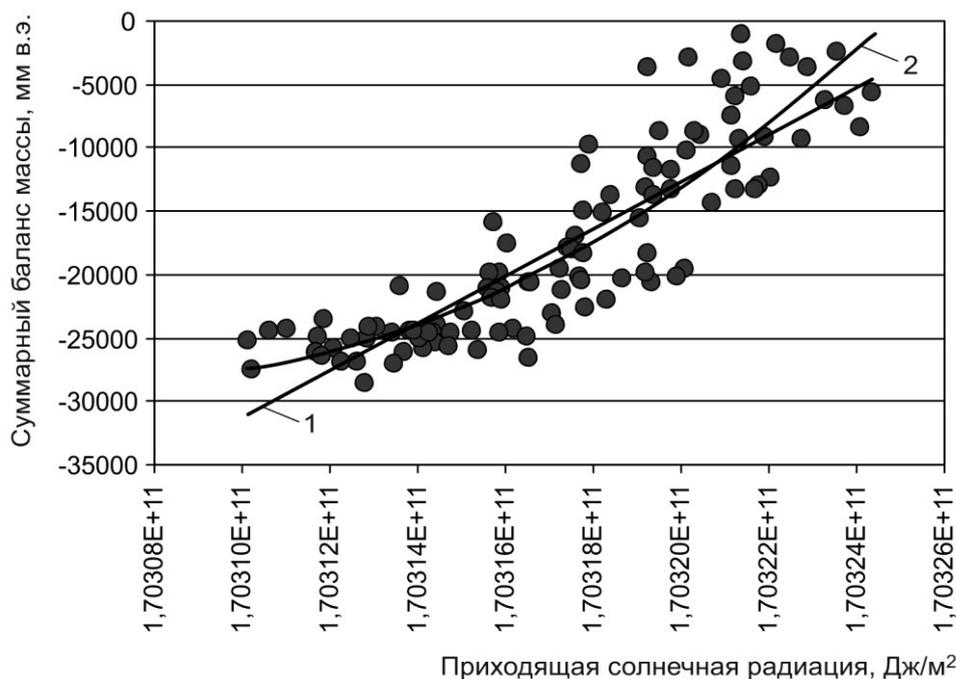


Рис. 2. Связь суммарного баланса массы ледника Джанкуат с приходящей на ВГА солнечной радиацией и графики уравнения линейной (1) и полиномиальной (2) регрессии.

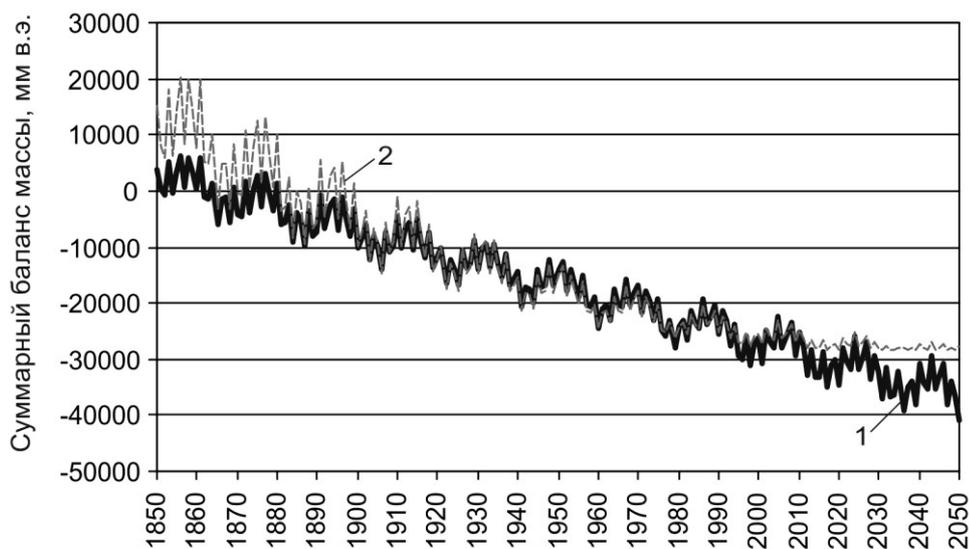


Рис. 3. Тенденция изменения суммарного баланса массы ледника Джанкуат рассчитанная по уравнению линейной регрессии (1) и по полиномиальному уравнению регрессии (2).

Значение коэффициента корреляции между суммарным балансом массы ледника и приходящей солнечной радиацией в этом случае составляет 0,694 (положительный знак коэффициента корреляции определяется сокращением приходящей солнечной радиации – рис. 1). Отклонения фактических значений суммарного баланса массы от рассчитанных значений, определяются циркуляционными факторами, что подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции суммарного баланса массы с продолжительностью групп циркуляции (табл. 1). Таким образом, тенденция изменения суммарного баланса массы репрезентативного ледника Джанкуат (и, вероятно, многих ледников Центрального Кавказа для которого ледник считается

репрезентативным) связана с совместным влиянием радиационного и циркуляционного фактора. При этом, основным фактором тенденции в изменении баланса в этом ледниковом районе является радиационный. Отклонения от тенденции время от времени в ту или иную сторону определяются циркуляционными факторами.

Проведены исследования изменения продолжительности разных типов циркуляции в связи с особенностями в поступлении и распределений приходящей на ВГА солнечной радиации (Федоров, Кононова, 2014). В результате найдена связь продолжительности зональной (З+НЗ) и меридиональной (МС+МЮ) циркуляции, соотношение которых является профилирующим признаком в типизации Б.Л. Дзердзеевского с приходящей на ВГА солнечной радиацией и разностью солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную области северного полушария Земли. Определена связь продолжительности групп циркуляции меридиональной южной и нарушения зональности с приходящей солнечной радиацией и разностью солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы в экваториальную и полярную области северного полушария Земли (табл. 1). Получен различный характер отклика продолжительности зональной и меридиональной циркуляции и отдельных групп циркуляции (меридиональной южной и нарушения зональности) на изменение значений приходящей солнечной радиации и разности солнечной радиации, поступающей на ВГА в экваториальную и полярную область северного полушария. На основе найденной связи продолжительности групп циркуляции с инсоляцией рассчитана продолжительность зональной и меридиональной циркуляции и отдельных групп циркуляции (меридиональной южной и нарушения зональности) в северном полушарии на период до 2050 г. Полученные связи суммарного баланса массы с продолжительностью отмеченных типов циркуляции и с инсоляцией на уровне вековых интервалов – тенденции, позволяют определить, во-первых, причины этой тенденции и, во-вторых – ее направление (знак) к сокращению. Таким образом, масса льда ледника Джанкуат характеризуется тенденцией к сокращению, связанной с усилением межширотного градиента инсоляции (разности солнечной радиации, приходящей в экваториальную и полярную область полушария) и увеличением продолжительности МЮ циркуляции (усилением межширотного теплообмена).

В тоже время, полученные нами ранее данные по динамике массы льда в различных ледниковых районах северного полушария для временных интервалов малой продолжительности (от 5 до 25 лет) показывают существование (на фоне общей тенденции к сокращению) метахронности в эволюции массы льда. Метахронность в динамике баланса массы в отдельных ледниковых районах северного полушария, ее пространственно-временные особенности и причины определяются циркуляционными процессами в атмосфере – действием групп циркуляции, по-разному проявляющимся в различных ледниковых районах, и продолжительностью их действия (Федоров, 2011).

Так, для ледниковых районов Канадского Арктического архипелага, Аляски, Кордильер и Альп отмечаются отрицательные корреляционные связи динамики баланса массы с продолжительностью меридиональной южной циркуляции и положительные связи – с продолжительностью циркуляции группы нарушения зональности. Для ледниковых районов Скандинавии и Кавказа характер связей динамики баланса массы с продолжительностью действия этих групп циркуляции противоположный: динамика баланса массы в этих районах характеризуется положительными корреляционными связями с продолжительностью меридиональной южной циркуляции и отрицательными связями – с продолжительностью действия группы нарушения зональности. Таким образом, отмеченные региональные особенности (метахронность) динамики баланса массы объясняются влиянием циркуляционных факторов, прежде всего – продолжительностью меридиональной

южной циркуляции и продолжительностью действия ЭЦМ группы нарушения зональности.

При более детальном во времени анализе отмечаемого для ледника сокращения массы льда относительно других ледниковых районов северного полушария будет отмечаться некоторое замедление тенденции сокращения (например, относительно Альп, где, сокращением массы льда будет ускоряться). Однако, например, в Скандинавии – процесс замедления сокращения массы льда проявляется еще сильнее, чем на Кавказе.

Заключение

Современная эволюция массы льда на леднике Джанкуат характеризуется двумя основными факторами: радиационным и циркуляционным. Основными характеристиками эволюции является тенденция и вариации массы льда относительно тенденции. Тенденция сокращения массы льда ледника Джанкуат определяется эффектом усиления межширотного теплообмена, что подтверждается, во-первых, тесной отрицательной связью суммарного баланса массы с разностью солнечной радиации приходящей в экваториальную и полярную область северного полушария (инсоляционной контрастностью). Во-вторых, высокой отрицательной связью суммарного баланса массы с изменением продолжительности меридиональной южной циркуляции. Вариации суммарного баланса массы (на интервалах от 5 до 25 лет) определяются изменением в соотношения продолжительности действия разных типов циркуляционных процессов в атмосфере (Федоров, 2011). Таким образом, тенденция изменения массы ледника Джанкуат на длительных временных интервалах (десятки – первые сотни лет) определяется, главным образом, радиационным фактором. На менее продолжительных интервалах времени (годы – первые десятки лет) многолетняя тенденция существенно нарушается (ускоряется или замедляется) влиянием циркуляционного фактора.

В связи с неоднозначностью формы связи суммарного баланса массы как с продолжительностью действия разных типов циркуляции, так и с приходящей солнечной радиацией (линейная, полиномиальная или иная), вопрос о возможностях точной предсказуемости эволюции массы льда остается пока открытым. Так, в случае линейной зависимости баланс массы ледника будет сокращаться, а в случае полиномиальной – состояние ледника будет близко к стационарному (рис. 3). Учитывая, что Ледник Джанкуат является репрезентативным для Центрального Кавказа, можно считать, что отмеченная тенденция в изменении ледовых ресурсов будет характерна и для всего Центрального Кавказа.

Список литературы

1. *Алейникова А.М.* Возраст моренных отложений долины р. Адыл-су (Приэльбрусье) по материалам лихенометрической съемки // МГИ. 2001. Вып. 90. С. 50–56.
2. *Воейков А.И.* Климата земного шара, в особенности России / Собрание соч. М.-Л.: АН СССР, 1948. Т. 1. С. 161–748.
3. *Гирс А.А.* Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 488 с.
4. *Глазырин Г.Е., Муравьев Я.Д., Шираева Т.* Расчет показателей баланса массы горного ледника по данным метеонаблюдений на ближайшей метеостанции // МГИ. 1999. Вып. 87. С. 95-97.
5. *Гобеджашвили Р.Г.* Ледники Грузии. Тбилиси.: изд. Мецниереба, 1989. 128 с.

6. *Голодковская Н.А.* Динамика ледников южного склона Центрального Кавказа за последние 700 лет // МГИ. 1982. Вып. 45. С. 76–84.
7. *Дзердзеевский Б.Л., Курганская В.М., Витвицкая З.М.* Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов. / Тр. НИУ ГУГМС. Гидрометиздат, 1946. 80 с.
8. *Докукин М.Д.* Формирование гляциальных селевых очагов при деградации ледников Приэльбрусья // МГИ. 1985. Вып. 53. С. 62–71.
9. *Дюргеров М.Б., Поповнин В.В.* Реконструкция баланса массы, пространственного положения и жидкого стока ледника Джанкуат со второй половины XIX в. // МГИ. 1980 (1981). Вып. 40. С. 73–82.
10. *Залиханов М.Ч., Коломыц Э.Г., Панов В.А., Докукин М.Д.* Прогноз изменений климата, высокогорных ландшафтов и оледенения Большого Кавказа на ближайшие десятилетия / Тезисы докладов. Восьмой всесоюзный гляциологический симпозиум «Льды и климат: реконструкция и прогноз». М.: 1984. С. 80–81.
11. *Золотарев Е.А., Сейнова И.Б.* Изменение ледников бассейна р.Баксан в последние столетия // МГИ. 1985. Вып. 53. С. 192–196.
12. *Золотарев Е.А.* О конечной «морене 30-х годов» и размерах ледника Джанкуат // МГИ. 1999. Вып. 87. С. 177–183.
13. *Кондратьев К.Я.* Глобальный климат и его изменения. Л.: Наука, 1987. 232 с.
14. *Кононова Н.К.* Исследования многолетних колебаний циркуляции атмосферы Северного полушария и их применение в гляциологии // МГИ. 2003. Вып. 95. С. 45–65.
15. *Кононова Н.К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
16. *Котляков В.М., Осипова Г.Б., Поповнин В.В., Цветков Д.Г.* Последние публикации Всемирной службы мониторинга ледников: традиции и прогресс // МГИ. 1997. Вып. 82. с. 125-136.
17. *Ледник Джанкуат (Центральный Кавказ)* / ред. И.Я.Боярского. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 184 с.
18. *Мацковский В.В., Кононова Н.К.* Цифровое картирование изменения схем циркуляции атмосферы при анализе повторяемости опасных природных процессов // Сергеевские чтения, вып. 11. Моделирование при решении геоэкологических задач. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (23-24 марта 2009 г.). М.: ГЕОС, 2009. С. 70-74.
19. *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.–Л.: ГОНТИ, 1939. 208 с.
20. *Монин А.С.* Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 246 с.
21. *Монин А.С., Шишков Ю.А.* История климата. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 408 с.
22. *Монин А.С., Шишков Ю.А.* Климат как проблема физики // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170. № 4. С. 419–445.
23. *Орешникова Е.И.* Ледники эльбрусского района по исследованиям 1932–1933 гг. Тр. Ледниковых экспедиций, Вып. 3. Кавказ, М.: 1936. С. 239–297.
24. *Панов В.Д.* Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 432 с.
25. *Поповнин В.В., Петраков Д.А.* Ледник Джанкуат за минувшие 34 года (1967/68 – 2000/2001) // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 167–174.
26. *Смольский И.И., Кротов О.И.* Новый алгоритм расчета инсоляции Земли / Институт криосферы Земли СО РАН. Тюмень, 2013. Деп. ВИНТИ, 08.04.2013 № 103-В2013. 38 с.

27. Турманина В.И. Исследование эволюции ледника Джанкуат фотоиндикационными методами // МГИ. 1971. Вып. 18. С. 106–109.
28. Федоров В. М. Макроциркуляционная модель реконструкции динамики баланса массы ледников Норвегии в XX столетии // МГИ. 2006. № 100. С. 73–79.
29. Федоров В. М. Макроциркуляционная модель реконструкции и прогноза динамики баланса массы субарктических ледников // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2007, № 3. С. 18–26.
30. Федоров В. М. Реконструкция динамики баланса массы ледника Джанкуат в XX столетии на основе макроциркуляционной модели // МГИ. 2009. № 105. С. 106–110.
31. Федоров В.М. Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере. М.: Изд. Физматлит, 2011. 368 с.
32. Федоров В.М. Широтная изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах // Доклады РАН, 2015 а. Т. 460. № 3. С. 339–342.
33. Федоров В. М. Изменение ледовых ресурсов отдельных ледниковых районов северного полушария в XX в // Водные ресурсы, 2015 б. Т. 42. № 1. С. 3–12.
34. Федоров В.М. Инсоляция Земли и современные изменения климата. М. Физматлит, 2018. 232 с.
35. Федоров В.М., Кононова Н.К. Солнечная радиация, приходящая на верхнюю границу атмосферы, и изменчивость циркуляционных процессов в Северном полушарии // Труды ГГО, 2014. Вып. 576. С. 183–200.
36. Цымбаленко Т.Т., Байдаков А.Н., Цымбаленко О.С., Гладиллин А.В. Методы математической статистики в обработке экономической информации. М.: Финансы и статистика, 2007. 200 с.
37. Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. Колебания солнечного облучения Земли, вызванные вековыми изменениями элементов земной орбиты // ДАН СССР, 1968. Т. 182. № 2. С. 291–293.
38. Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. Вековые изменения орбиты Земли и астрономическая теория колебаний климата // Труды Института теоретической астрономии АН СССР, 1969. Вып. 14. С. 48–84.
39. Шулейкин В.В. Физика моря. М.: АН СССР, 1953. 989 с.
40. Berger A.L. Long-term variations of daily insolation and quaternary Climatic Changes. Journal of the atmospheric sciences. 1978a, V. 35. № 9. P. 2362–2367.
41. Berger A.L. Long-term variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements. Quaternary research. 1978b, V. 9. P. 139–167.
42. Berger A.L, Loutre M.F. Insolation values for the climate of the last 10 million years? Quatern. Sci. Rev. 1991, V. 10. P. 297–317.
43. Berger A., Loutre M.F., Yin Q. Total irradiation during any time interval of the year using elliptic integrals. Quaternary science reviews. 2010, V. 29. P. 1968–1982. Doi: 10.1016/j.quascirev.2010.05.07.
44. Bertrand C., Loutre M.F., Berger A. High frequency variations of the Earth's orbital parameters and climate change. Geophysical research letters. 2002 а, V. 29. № 18. P. 1893. Doi: 10.1029/2002GL015622.
45. Bertrand C., Van Ypersele J.B., Berger A. Are natural climate forcings able to counteract the projected antropogenic global. Climatic Change. 2002 б, V. 55. P. 413–427.
46. Borisenkov E.P., Tsvetkov A.V., Agaponov S.V. On some characteristics of insolation changes in the past and the future. Climatic Change. 1983, V. 5. Is. 3. P. 237–244.
47. Borisenkov E.P., Tsvetkov A.V., Eddy J.A. Combined effects of Earth orbit perturbations and solar activity on terrestrial insolation. Part I: Sample days and annual mean values. Journal of the atmospheric sciences. 1985, V. 42. № 9. P. 933–940.
48. Bretagnon P. Theorie du mouvement de l'ensemble des planetes. Solution VSOP82. Astronomy and Asrtrophysics. 1982, V. 114. P. 278–288.

49. *Brouwer D., Van Woerkom A.J.J.* The secular variation of the orbital elements of the principal planets. *Astronomical Papers.* 1950, V. 13. P. 81–107.
50. *Giorgini J.D., Yeomans D.K., Chamberlin A.B., Chodas P.W., Jacobson R.A., Keesey M.S., Lieske J.H., Ostro S.J., Standish E.M., Wimberly R.N.* JPL's On-Line Solar System Data Service. *Bulletin of the American Astronomical Society.* 1996, V. 28(3). P. 1158.
51. <http://www.atmospheric-circulation.ru> Электронный ресурс «Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в XX – начале XXI вв.».
52. <http://ssd.jpl.nasa.gov> – NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics).
53. http://www.wmo.int/pages/index_ru.html. – Электронный ресурс Всемирной метеорологической организации.
54. <http://www.solar-climate.com> – Электронный ресурс «Солнечная радиация и климат Земли. 2016».
55. *Kopp G., Lean J.* A new lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters.* 2011, V. 37. L01706. Doi: 10.1029/2010GL045777.
56. *Loutre M.F., Berger A., Bretagnon E., Blanc P.L.* Astronomical frequencies for climate research at the decadal to century time scale. *Climate dynamics.* 1992, V. 7. P. 181–194.
57. *Standish E.M.* Orientation of the JPL Ephemerides, DE200/LE200, to the Dynamical Equinox of J2000. *Astronomy and Astrophysics.* 1982, V. 114. P. 297-302.
58. *Vernecar A.D.* Long-period global variations of incoming solar radiation, (Meteorological monographs). Published by American Meteorological Society. Boston, 1972. V. 12, № 34. P. 121.

THE ANALYSIS OF CHANGES IN GLACIATION OF THE CENTRAL CAUCASUS

Fedorov V. M., Zalikhanov A. M.

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation,
e-mail: fedorov.msu@mail.ru*

We calculated values of coming to the upper limit of the atmosphere solar radiation on the initial data of astronomical ephemerides. Were compared the values of the total mass balance of the Dzhankuat glacier with the calculated values of incoming to the upper limit of the atmosphere solar radiation for the year in the Northern hemisphere. Also the total mass balance is compared with the difference between incoming solar radiation in the Equatorial and polar region of the Northern hemisphere. Based on the calculated values of incoming solar radiation we calculated the total mass balance for the Dzhankuat glacier by the obtained regression equations for the period from 1850 to 2050.

Comparison based on the correlation analysis showed that the decline in the ice mass of the Dzhankuat glacier is determined by the amplification effect of inter-latitude heat transfer. First, it confirmed the close negative correlation of the total mass balance and the difference between incoming to the Equatorial and polar region solar radiation in the Northern hemisphere. Secondly, there is a high negative correlation between the total mass balance and change in the duration of the longitudinal southern circulation.

It is determined that the declining trend of the total mass balance of the Dzhankuat glacier is closely related to the accumulated incoming solar radiation. It is proof of the enhanced greenhouse effect in the atmosphere due to the accumulation of solar radiation heat. Consequently, the trend of Dzhankuat glacier mass on long time intervals (tens – the first hundred years) is determined mainly by the radiation factor. For shorter time periods (years - a few tens of years) long-term trend is experiencing a significant effect of the circulation factor.

Key words: mountain glaciers, the Caucasus, solar radiation, circulation processes, total mass balance, correlation, regression equation, trends.

Поступила в редакцию 14.09.2018 г.