

Связь вулканической активности и климатических изменений на Алтае по данным исследования ледникового керна горы Белуха

© 2013 г. Н.С. Малыгина¹, Т.В. Барляева², Т.С. Папина¹

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул;

²Европейский центр исследований и образования в области наук о Земле и окружающей среде, Экс-ан-Прованс, Франция
natmgn@gmail.com

Статья принята к печати 29 сентября 2012 г.

Алтай, вулканические извержения, изменение климата, ледниковый керн.
Altai, climate change, ice core, volcanic eruptions.

Впервые с помощью вейвлет-анализа и анализа вейвлет-кросскогерентности и фаз проанализирована связь климатических изменений на Алтае, реконструированных по данным высокогорного ледникового керна, взятого с седловины горы Белуха, и вулканической активности, описанной индексами VEI, DVI и IVI, за последние 750 лет. Полученные фазовые соотношения изменений концентраций сульфатов в керне и вулканических индексов, а также противофазные низкочастотные статистически значимые сигналы между индексами вулканической активности и температурой воздуха позволяют говорить о зависимости изменений термического режима на Алтае от вулканической активности. При этом в малый ледниковый период отмечается запаздывание климатических изменений относительно вулканической деятельности, что может быть связано с наложением влияния солнечной активности на изменения термического режима.

Введение

В течение последних тысячелетий вулканические извержения представляют собой одну из основных причин климатических изменений [10, 43]. Это происходит наряду с циклической сменой орбитальных параметров Земли, вариациями солнечной активности, колебаниями концентраций парниковых газов и изменениями в циркуляции атмосферы. Воздействие вулканизма на состояние климатической системы в разных временных масштабах диаметрально противоположно [9, 11, 33], что затрудняет прогнозирование изменений климата при использовании моделей с чётко ограниченными неопределённостями [26, 31]. Совершенствование и верификация таких моделей возможны путём привлечения данных о климатических (температуре, осадках, циркуляции и др.) и палеоэкологических (вулканизме, биологической продуктивности и др.) изменениях, полученных из надёжных источников, например палеоархивов [18]. Естественные палеоархивы в отличие от документальных данных и материалов натуральных наблюдений покрывают во временном интервале не только столетия, но десятки и сотни тысяч лет, что повышает качество прогнозов климатических изменений на основе моделей с ограниченными неопределённостями. В качестве палеоархивов, данные которых активно используются для оценки роли вулканизма в

изменениях климата на Земле, выступают полярные ледники и древесные кольца [10].

Продукты вулканизма (диоксид и оксид углерода и серы, азот, водород, аммиак, хлористый водород, сероводород, метан и др.) после поступления в атмосферу с разной степенью интенсивности и удалённости от места извержения осаждаются на земную поверхность. При этом вулканические продукты, осаждаясь на ледниках и ледниковых покровах, чаще всего полностью «фиксируются» в снежно-фирновых и ледниковых толщах и содержат информацию о вулканизме за последние сотни, а иногда и десятки тысяч лет. Идентифицируются вулканические сигналы в основном по изменению концентраций сульфатов, кислотности, электропроводности и диэлектрической проницаемости в кернах полярных ледников. Одна из первых работ по идентификации вулканических сигналов на основе изменения электропроводности в Гренландском ледниковом керне – исследование К. Хаммера с коллегами [16, 17]. Практически параллельно с этими работами Р. Дельмас и К. Бутрон [13] вели первые исследования по идентификации вулканических сигналов в антарктических кернах, но уже по данным изменений концентраций сульфатов.

Позже при гляциохимическом анализе полярных ледниковых кернов процесс идентификации вулканических сигналов по изменению электро-

проводности и/или диэлектрической проницаемости стали комбинировать с идентификацией сульфатных сигналов, что позволило улучшить результаты и избежать ряда ошибок. Так, при идентификации вулканических сигналов только по данным электропроводности и/или диэлектрической проницаемости предполагается, что пиковые повышения кислотности обусловлены максимальными концентрациями серной кислоты [17]. При этом резкие повышения могут накладываться на относительно стабильные значения сульфатных изменений, связанных с непрерывной (не вулканической), например, морской или биогенной эмиссией в доиндустриальный период. При этом наличие других кислот (например, азотной кислоты), нейтрализация кислотности за счёт поступления щелочной пыли, а также структурные и теплофизические свойства льда усложняют идентификацию вулканических сигналов [14] на основе только одного исследовательского подхода [10].

В настоящее время идентифицированы вулканические сигналы более чем по полусотне полярных ледниковых кернов, охватывающих временной интервал до 45 тыс. лет (EPICA Dome C core 45) [7, 8] и имеющих временное разрешение в один год для последних 12 тыс. лет (Dome Siple, Западная Антарктида) [20]. Возможность использования дендропалеоархивов в качестве источников сведений о палеовулканизме основана на том, что мощные вулканические извержения приводят к изменениям термического режима, в том числе и в вегетационный период, что отражается в видимых изменениях или повреждениях клеток ствола дерева. Таким образом, точное определение ширины и плотности годичного кольца даёт возможность идентифицировать вулканические извержения. На основании этого В. ЛаМарш и К. Хиршбоек [21] одними из первых использовали данные о структуре годичных колец *Bristlecone pines* для оценок климатических изменений под воздействием вулканических извержений за период более 3500 лет, а М. Зальцер и М. Хугес в работе [36] расширили этот временной интервал до 5000 лет. Были выполнены также работы, позволяющие оценить последствия вулканических извержений на основе годовой ширины колец и их плотности по данным дендропалеоархивов из других регионов [6, 12, 19, 41]. Таким образом, вместе с ледниковыми кернами дендропалеоархивы представляют собой альтернативный источник информации о палеовулканизме и его воздействиях на климатическую систему.

Постановка проблемы

Идентификация вулканических сигналов в полярных ледниковых кернах и оценка на их основе степени воздействия вулканизма на климатическую систему — весьма актуальные задачи, решения которых можно использовать для получения надёжных прогнозов климатических изменений на ближайшее будущее. При этом особая роль отводится высокогорным внутриконтинентальным ледникам, изучение которых позволяет оценить воздействие вулканизма на климат густонаселённых внутриконтинентальных районов как на глобальном, так и на региональном уровнях. На Евразийском континенте за последние 50 лет отобрано более полусотни ледниковых кернов, которые можно использовать в качестве надёжных палеоархивов. При этом для Центральной Азии, территория которой не испытывает значительного влияния муссонной циркуляции и практически равно удалена от океанов, имеется около 10 кернов, среди которых важное место занимает керн ледника на горе Белуха, отобранный совместной Российско-швейцарской экспедицией в 2001 г. на седловине горы (Катунский хребет, Республика Алтай; 49° 48' 26,3" с.ш., 86° 34' 42,8" в.д., абс. высота 4062 м, длина 142 м) [29]. Этот керн имеет хорошее временное разрешение (год и менее) и покрывает период в 750 лет. К настоящему времени завершено его датирование. Керн также послойно проанализирован на содержание минеральных и биогенных элементов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , COOH). Дополнительно по содержанию $\delta^{18}\text{O}$ в ледниковом керне реконструирована кривая температурных изменений на Алтае за последние 750 лет с шагом 1–3 года [15, 29, 30].

Цель нашей работы — оценить влияние вулканической активности на климат Алтая за последние 750 лет на основе сравнительного анализа существующих индексов вулканической активности и реконструкций содержания вулканических маркеров (изменение температуры и концентраций сульфатов) в керне ледника Белуха с помощью вейвлет-анализа и анализа вейвлет-кросс-когерентностей и фаз.

Материалы и методика исследования

Выполненная нами оценка влияния вулканизма на климат Алтая основана на сопоставлении реконструированных температур и концентраций сульфатов (они могут выступать в качестве маркеров вулканических извержений) в ледниковом керне горы Белуха с индексами вулканической

Индексы вулканической активности

Название индекса	Единицы измерения	Методика расчёта	Литература
Dust veil index (DVI)	Извержение вулкана Кракатау (DVI = 1000)	Наблюдения за закатами, излучением и извержениями [37]	[22–24, 37]
Mitchell	Масса аэрозолей	На основе данных Х.Х. Лэма	[27]
Volcanic explosivity index (VEI)	Извержение вулкана Кракатау (VEI = 6)	Извержения, геологические и исторические отчёты	[28, 39, 40]
Sato	$\tau(\lambda = 0,55\mu\text{m})$	Радиационные и спутниковые наблюдения [25]	[38]
Ice core volcanic index (IVI)	$\tau(\lambda = 0,55\mu\text{m})$	На основе изменений кислотности и концентраций сульфатов в ледниковых ядрах	[33–34]

активности, разработанными для оценки степени воздействия извержения вулканов на окружающую среду. Сейчас наиболее широко используют пять индексов вулканической активности (таблица). В исследованиях последних лет чаще применяют три из них – VEI, DVI, IVI.

Volcanic Explosivity Index (VEI) введён в 1982 г. Кр. Ньюхоллом и С. Селфом [28, 34]. Этот индекс используется преимущественно для оценки относительной мощности вулканического извержения. При определении значения индекса VEI для каждого вулканического извержения учитываются как количественные (объём выброшенных вулканических продуктов извержения и высота вулканического облака), так и качественные характеристики (например, визуальная оценка мощности извержения). Вычисляется индекс VEI для каждого извержения отдельно и измеряется в относительных единицах. Среднегодовые значения VEI (глобальные и по полушариям) рассчитываются по значениям VEI для отдельных извержений.

Dust Veil Index (DVI) предложен Х.Х. Лэмом в 1970 г. [22] для оценки климатических последствий вулканических извержений. Для расчёта значений индекса DVI проанализированы отдельно взятые вулканические события с помощью пяти разных методик, каждая из которых основана на разноплановых оценках климатических изменений в результате извержения вулканов с допущением, в случае необходимости, субъективных поправок [22]. Кроме значений индексов DVI для отдельных извержений, можно рассчитать как глобальные значения индекса, так и по полушариям. Значения индекса DVI можно найти в базе NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA [44].

Ice core volcanic index (IVI) предложен А. Робком и М. Фри [33, 35]. В качестве характеристики вулканической активности они использовали гляциохимические данные ледниковых кернов с 1850

по 1995 г. Позднее А. Робок [32] расширил временной интервал для IVI до 453 г. н.э. Первоначальные значения индекса IVI были получены с использованием данных изменения кислотности и сульфатов в восьми полярных и приполярных ядрах Северного полушария и шести ядрах Южного полушария. Поэтому изначально на формирование значений индекса IVI избыточное влияние оказывали извержения в высоких широтах ввиду их географической близости к местам отбора ледниковых ядер. Кроме того, по данным исследования ледниковых ядер в последнем столетии интенсивно увеличивается концентрация сульфатов при снижающейся их межгодовой изменчивости, за исключением отдельных пиковых значений. Эти межгодовые изменения, скорее всего, связаны не с вулканической активностью, а с ростом вклада антропогенной составляющей в поступление сульфатов в окружающую среду. Таким образом, использование индекса IVI и интерпретация полученных на его основе результатов должны проводиться очень осторожно и с учётом описанных выше особенностей расчёта индекса.

Чтобы оценить влияние вулканической активности на климат Алтая, мы сравнили индексы вулканической активности с ледниковыми реконструкциями вулканических маркеров путём вейвлет-анализа и анализа вейвлет-кросскогерентностей и фаз. Важная особенность вейвлет-анализа – возможность не только установить доминирующие в исследуемом (стационарном или нет) сигнале частоты, но и проследить их эволюцию. К существенным достоинствам анализа вейвлет-кросскогерентностей и фаз можно отнести идентификацию зон амплитудно-частотной когерентности двух рассматриваемых рядов, а также оценку их амплитудных и фазовых соотношений. В данной работе использован пакет программ по обработке рядов данных с применением вейвлет-анализа и анализа вейвлет-

кросскогерентности и фаз, разработанный для среды MATLAB А. Гринстедом и находящийся в свободном доступе в сети Интернет [45].

Базовой вейвлет-функцией служил вейвлет «Морле» при значении безразмерного параметра $\omega_0 = 6$. Результаты визуализируются в виде амплитудно-частотного спектра. Статистически значимые сигналы (уровень значимости 5% против «красного» шума) обведены на спектре жирными чёрными линиями; за достоверные принимались результаты, которые попадают внутрь «конуса доверия», учитывающего краевые эффекты и отмеченного на спектре. «Карта цветов» спектра соответствует значениям амплитуд. Анализ вейвлет-кросскогерентностей и фаз, по сути, некое «расширение» вейвлет-анализа. Он позволяет устанавливать частоты и временные интервалы наблюдаемой когерентности двух рядов, а также определять их фазовое соотношение в каждый момент времени. Фазовые соотношения отмечаются на спектре стрелками. Направление стрелок слева направо означает, что ряды находятся в фазе; справа налево – в противофазе; остальные направления соответствуют промежуточным значениям фаз (см. рис. 1–3). В случае обоих методов важно, насколько продолжительна и устойчива по времени область выделенной частоты спектра. Детали и особенности вейвлет-анализа и анализа вейвлет-кросскогерентности и фаз, а также примеры их применения к реальным данным обсуждаются в работах [1, 25, 42, 45].

Результаты и их обсуждение

В ряде работ, посвященных изучению влияния вулканических извержений на климат по данным ледниковых кернов, показана синхронная зависимость изменений концентраций сульфатов и температур [9, 32–35]. Поэтому для выявления синхронных изменений температурный ряд и ряд концентраций сульфатов, реконструированные по данным изучения ледникового керна горы Белуха, мы проанализировали с помощью вейвлет-анализа. И в данных по температуре, и в данных по сульфатам (рис. 1) обнаружены статистически значимые сигналы примерно на 200-летней периодичности в конце XVII – начале XVIII в. Вариации с подобным периодом могут быть и солнечного, и вулканического происхождения. Так, наличие ~200-летней вариации в температурном ряде ледникового керна горы Белуха и возможность её обусловленности солнечной активностью обосновывалась в работе [15]. В исследовании [5] показано воздействие периодичности активности Солнца на периодичность геодинамических процессов. Однако, учитывая особенность вейвлет-анализа, касающуюся принятия в качестве достоверных только результатов, попадающих внутрь конуса доверия, а также ограниченную длину анализируемых рядов, выводы могут быть сделаны только для ограниченного интервала времени – с 1500-х по 1800-е годы.

В обоих рядах прослеживаются также статистически значимые «островки» на высоких частотах

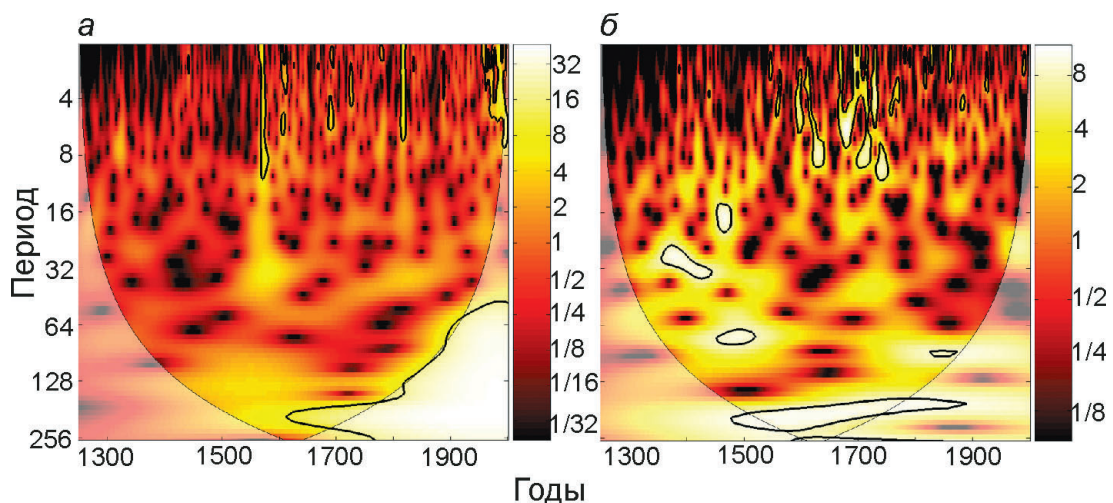


Рис. 1. Вейвлет-спектры реконструированных концентраций сульфатов (а) и температур (б) по данным ледникового керна седловины горы Белуха.

Условные обозначения см. в тексте

Fig. 1. Wavelet spectra of the reconstructed sulfate concentrations (а) and the temperature (б) in the Belukha glacier ice core. For the notations see the main text

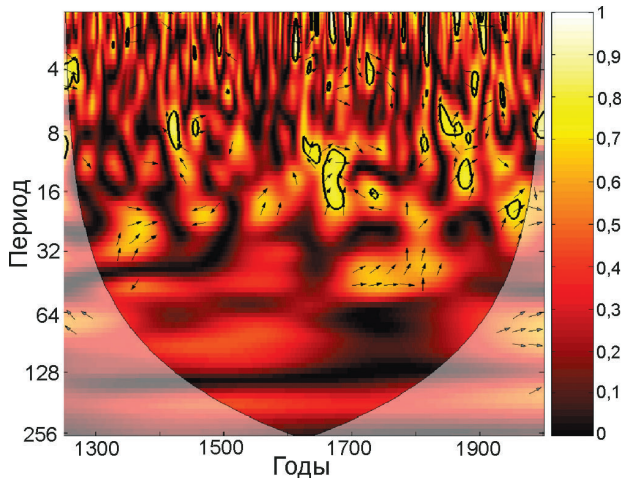


Рис. 2. Спектры вейвлет-кросскогерентности и фазовых соотношений реконструированных концентраций сульфатов и температур по данным ледникового ядра седловины горы Белуха

Fig. 2. Spectra of wavelet cross coherence and phase of the reconstructed sulfate concentrations and the temperature in the Belukha glacier ice core

тах (периоды 1–12 лет) в интервале 1600–1800 гг., которые, как и 200-летние вариации, могут иметь двойственную природу происхождения. В температурном ряду выделяются также статистически значимые «островки» на периодах 16–22 года (1450–1500 гг.), 28–36 лет (1375–1450 гг.), в районе 70 лет (1475–1525 гг.) и 90 лет (1825–1875 гг.), по своей продолжительности близкие к климатическим циклам [4]. Таким образом, вычленение в обоих рядах статистически значимых сигналов разного временного масштаба даёт основание говорить о возможности влияния вулканических извержений на климат. В дополнение к результатам, полученным с помощью вейвлет-анализа рядов температуры и сульфатов (см. рис. 1), для исследования наличия и эволюции когерентностей и фазовых соотношений между этими рядами был выполнен анализ вейвлет-кросскогерентности и фаз (wtc). Полученный спектр приведён на рис. 2. Как видно из спектра, ряды концентрации сульфатов и температуры когерентны в некоторых временных интервалах. Особенно интересно наличие когерентностей в диапазоне периодов от 16 до 32 лет, происхождение которых может быть связано с изменением и солнечной, и вулканической активности [2, 4]. Эти «островки» когерентности возникают примерно каждые 100 лет, т.е. при отсутствии устойчивой когерентности «островки» тем не менее наблюдаются стабильно, правда, не всегда на ста-

тистически значимом уровне. Другая интересная особенность – наблюдающаяся на протяжении всего XVIII в. когерентность на периодичности 32–64 года. Она также статистически не значима, что, как и для ранее отмеченных случаев, может быть связано с зашумлённостью рассматриваемых рядов. При этом её возникновение в максимум малого ледникового периода [3] на Алтае скорее всего объясняется наложением влияний солнечной и вулканической активностей, которые, по мнению ряда авторов, и послужили причиной возникновения этой эпохи [32, 35].

Сопоставление температурных и сульфатных спектров с индексами VEI, DVI и IVI, характеризующими вулканизм, позволяет проследить воздействие вулканических извержений на наблюдающиеся в исследуемых рядах периодичности, а также оценить роль вулканизма в когерентностях на разных частотах между парами рядов и в эволюции наблюдаемых при этом фазовых соотношений. В процессе предварительных работ мы рассмотрели варианты использования вулканических индексов, рассчитанных как по полушариям, так и для всего земного шара. Приоритет был отдан использованию глобальных данных (по всему земному шару), любезно предоставленных проф. А. Робком, так как они наиболее ярко отражают картину вулканической активности. Также проведён анализ вейвлет-кросскогерентности и фаз глобальных значений VEI, DVI и IVI. Между исследуемыми индексами наблюдается продолжительная стабильная когерентность на низких частотах, соответствующая периодам ~64–128 лет на протяжении всего малого ледникового периода. К сожалению, ввиду ограниченной длины некоторых из анализируемых рядов и особенностей анализа вейвлет-кросскогерентностей и фаз (ограничения конусом доверия) невозможно проследить наличие аналогичной когерентности до и после этого периода. Более высокочастотная когерентность между индексами также наблюдается, но не всегда, что, вероятно, связано с разной техникой построения индексов и учётом разных параметров, порой субъективных. Отметим, что ранее в работе [15] показывалась возможность проявления в ядре горы Белуха вулканических сигналов после извержений, произошедших как в Северном, так и в Южном полушариях.

Выполненный нами анализ реконструированной температуры по данным ледникового ядра седловины горы Белуха и VEI_{global} с применением анализа вейвлет-кросскогерентности и фаз пока-

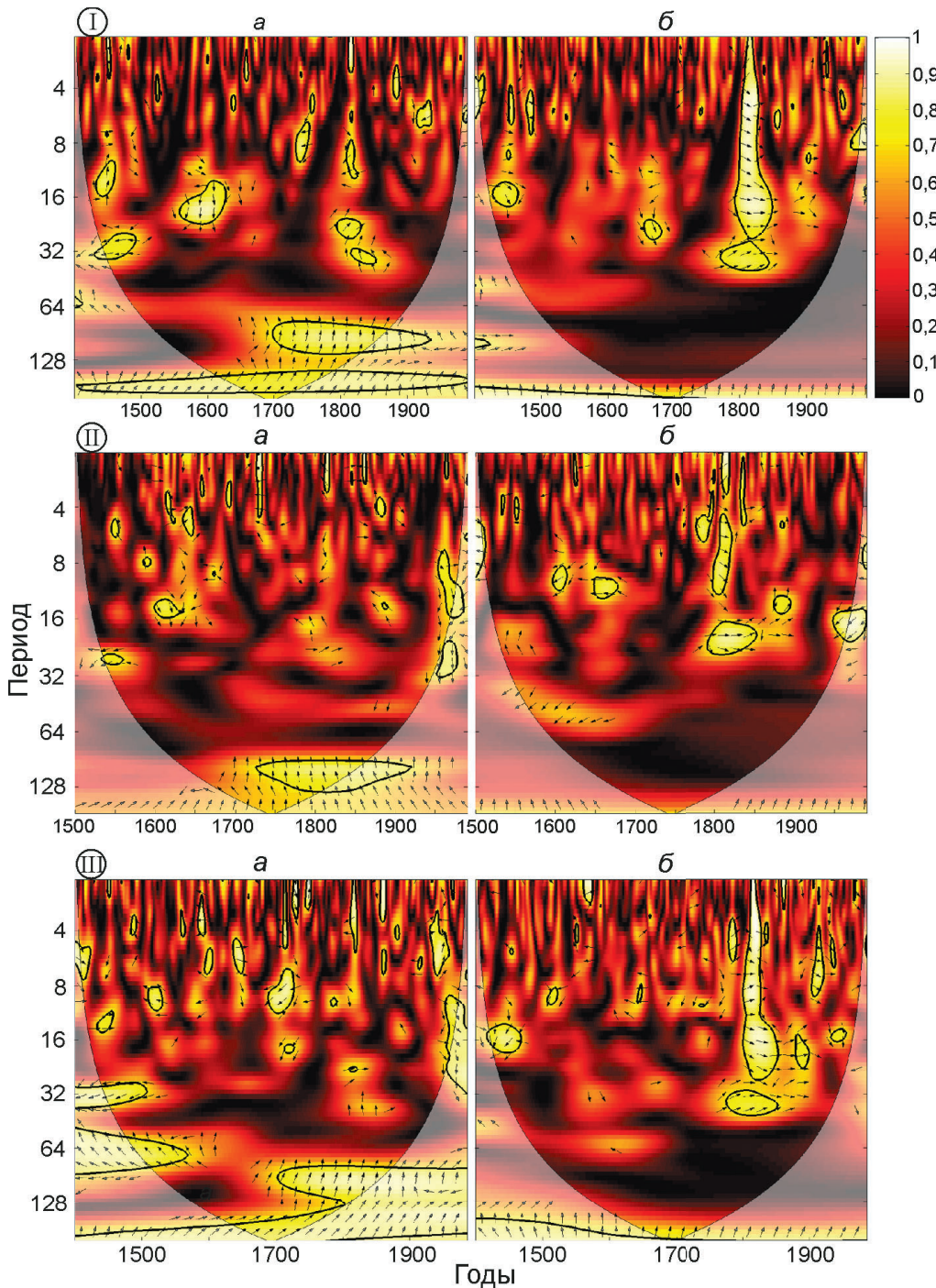


Рис. 3. Спектры вейвлет-кросскогерентности и фазовых соотношений индекса вулканической активности VEI_{global} (I), DVI_{global} (II), IVI_{global} (III) и реконструированных по данным ледникового ядра седловины горы Белуха температуры (*a*) и концентрации сульфатов (*б*)

Fig. 3. The spectra of wavelet cross coherence and phase of the volcanic activity index VEI_{global} (I), DVI_{global} (II), IVI_{global} (III) and the reconstructed in the Belukha glacier ice core temperature (*a*) and the sulfate concentration (*б*)

зал (рис. 3, I), что в районе 1850 г. наблюдается статистически значимый «островок» на трёхлетней периодичности. В интервалах 1700–1750 и 1450–1500 гг. наблюдается когерентность в 8- и 32-летнем сигналах. В обоих случаях ряды находятся в противофазе (т.е. при повышении значений индекса VEI температура понижается и, наоборот, при понижении значений индекса VEI повышается). Такое соотношение вулканической

активности и температуры логично и подтверждается результатами ряда работ [32, 34, 35], в которых показана зависимость изменений температурного режима от вулканической активности. Однако на сигналах с периодами от 16 до 32 лет (1800–1900 гг.), 96 лет (1750–1850 гг.) и 200 лет (1650–1750 гг.) увеличение значений индекса VEI ведёт к повышению температуры в первом случае и к её понижению в двух других случаях с запаз-

дыванием температуры относительно вулканической активности на четверть соответствующего периода. Возможно, это запаздывание связано с наложением солнечных циклов (выявленные периодичности близки во временном интервале к солнечным циклам) на вулканические изменения, что и приводит к запаздыванию отклика в температуре, так как температура на изменения солнечной и вулканической активности откликается с разной скоростью [2, 15].

Анализ VEI_{global} и концентраций сульфатов методом вейвлет-кросскогерентности и фаз показал статистически значимые сигналы на периодичностях от 6 до 32 лет на рубеже 1800 г. (см. рис. 3, I), т.е. мы наблюдаем высокочастотные изменения вулканической активности (VEI_{global}), которым соответствуют такие же изменения концентраций сульфата, представляющих собой вулканический маркер. Анализ реконструированной температуры и значений индекса DVI_{global} (см. рис. 3, II) показал наличие между этими рядами противофазных когерентностей от 3 до 6 лет на рубеже 1750-х годов. При этом в интервале 1750–1850 гг., как и в случае вейвлет-кросскогерентности температуры с индексом VEI_{global} (см. рис. 3, I), наблюдаются когерентности на периодичности ~96 лет, когда отмечается понижение температуры относительно повышения уровня вулканической активности с запаздыванием на четверть периода. Применение анализа вейвлет-кросскогерентности и фаз к содержанию сульфатов и DVI_{global} (см. рис. 3, II) показало наличие «островков» на высоких частотах (периоды от 6 до 11 лет) и 22-летнюю когерентность в интервале 1775–1825 гг. Однако в районе 1650 г. мы наблюдаем противофазную 11-летнюю когерентность, что отличается от данных сравнения с индексом VEI_{global} (см. рис. 3, I).

Самые интересные результаты получены при сравнении индекса вулканической активности IVI_{global} и реконструированных температур и сульфатов (см. рис. 3, III). При анализе спектра вейвлет-кросскогерентности и фазовых соотношений индекса вулканической активности IVI_{global} и реконструированного температурного ряда на рубеже 1650 г. обнаружена синфазная когерентность в интервале периодов 4–8 лет (повышению значений температур соответствовало повышение значений индекса и, наоборот, понижению значений температур отвечало понижение значений индекса). Кроме того, найдена когерентность на 11-летней периодичности около 1450 г. Установ-

лено также наличие противофазных низкочастотных когерентностей в интервале 1550–1600 гг. (с периодами от 1 года до 4 лет) и на рубеже 1800 г. (с периодами 3–5 лет). Как и при анализе температурных изменений с двумя другими ранее рассмотренными индексами, в 1750–1850 гг. на 96-летней периодичности наблюдается понижение температуры, которое предшествовало повышению уровня вулканической активности. Статистически значимые сигналы на периодичностях от 6- до 32-летних в районе 1800 г. получены при анализе изменений индекса IVI_{global} и концентраций сульфатов. Отметим, что графически проявление когерентностей сульфатов и индекса IVI_{global} очень схоже с проявлением когерентностей сульфатов и индекса VEI_{global} .

Выводы

Вычленение разновременных (высоко- и низкочастотных) статистически значимых сигналов в результате совместного анализа реконструированных данных (температуры и концентрации сульфатов) по ледниковому ядру горы Белуха и данных индексов VEI_{global} , DVI_{global} и IVI_{global} даёт возможность с большой степенью достоверности говорить о прямой связи между изменениями вулканической активности и температуры воздуха на Алтае. Это подтверждается полученными высокочастотными фазовыми когерентностями между индексами вулканической активности и реконструированной температурой, т.е. вулканическая активность и температура изменялись синхронно с периодичностями от 2–3 до 8–11 лет (близких по продолжительности и к климатическим, и к вулканическим и солнечным циклам) на временном интервале 1250–2000 гг. Выявленные низкочастотные противофазные когерентности с периодами от 16–22 до 32 лет между реконструированной температурой и индексами вулканической активности свидетельствуют, что повышения вулканической активности с периодами до нескольких десятков лет соответствовали понижению температуры с теми же периодами. Однако в малый ледниковый период (1550–1850 гг.) на Алтае наблюдались высокочастотные противофазные когерентности – повышение вулканической активности соответствовало понижению температуры и наоборот; при этом наблюдались запаздывания изменений температуры относительно вулканической активности на четверть 96- и 200-летних периодов, близких по продолжительности к солнечным периодам. Полученные фазо-

вые высоко- и низкочастотные когерентности между сульфатами («вулканическими» маркерами) и индексами вулканической активности с максимальным проявлением когерентностей в малый ледниковый период дополнительно подтверждают наличие связи между изменениями вулканической активности и термического режима на Алтае.

Благодарности. Авторы признательны швейцарским коллегам и доктору М. Швиковски за полученные совместные гляциохимические результаты ледникового кернового бурения горы Белуха.

Работа выполнена в рамках программы СО РАН «VII.63.3. Климатические изменения в Арктике и Сибири под воздействием вулканизма» проекта «VII.63.3.2. Ледники как индикаторы климатических изменений под влиянием вулканической деятельности».

Литература

1. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
2. Барляева Т.В., Миронова И.А., Понявин Д.И. О природе декадной вариации в климатических данных во второй половине XX века // ДАН. 2009. Т. 425. № 3. С. 395–399.
3. Жилина Т.Н. Западная Сибирь в Малый ледниковый период: природа и русская колонизация (1550–1850 гг.). Томск: Оптимум, 2009. 162 с.
4. Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебание климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы. М.: Наука, 2005. 191 с.
5. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической и вулканической активности. Burgas: SWB, 2008. 304 с.
6. Briffa K.R., Schweingruber F.H., Jones P.D., Osborn T.J., Shiyatov S.G., Vaganov E.A. Reduced sensitivity of recent tree growth to temperature at high northern latitudes // Nature. 1998. V. 391. P. 678–682.
7. Castellano E., Becagli S., Jouzel J., Migliori A., Severi M., Steffensen J.P., Traversi R., Udisti R. Volcanic eruption frequency over the last 45 ky as recorded in Epica-Dome C ice core (East Antarctica) and its relationship with climatic changes // Global and Planetary Change. 2004. V. 42. P. 195–205.
8. Castellano E., Becagli S., Hansson M., Hutteli M., Petit J.R., Rampino M.R., Severi M., Steffensen J.P., Traversi R., Udisti R. Holocene volcanic history as recorded in the sulfate stratigraphy of the European Project for Ice Coring in Antarctica Dome C (EDC96) ice core // Journ. of Geophys. Research. 2005. V. 110. D06114. doi:10.1029/2004JD005259.
9. Chenoweth M. Ships' Logbooks and «The Year Without a Summer» // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 2077–2094.
10. Cole-Dai J. Volcanoes and climate // WIREs Climate Change. 2010. V. 1. № 6. P. 824–839.
11. Cole-Dai J., Ferris D., Lanciki A., Savarino J., Baroni M., Thiemens M.H. Cold decade (AD 1810–1819) caused by Tambora (1815) and another (1809) stratospheric volcanic eruption // Geophys. Research Letters. 2009. V. 36. L22703. doi:10.1029/2009GL040882.
12. D'Arrigo R., Jacoby G., Free M., Robock A. Northern Hemisphere temperature variability for the past three centuries: tree-ring and model estimates // Climatic Change. 1999. V. 42. P. 663–675.
13. Delmas R.J., Boutron C.F. Are the past variations of the stratospheric sulfate burden recorded in central Antarctic snow and ice layers? // Journ. of Geophys. Research. 1980. V. 85. P. 5645–5649.
14. Delmas R.J., Legrand M., Delmas R.J. Spatial and temporal variations of snow chemistry in Terre Adélie (East Antarctica) // Annals of Glaciology. 1985. V. 7. P. 20–25.
15. Eichler A., Olivier S., Henderson K., Laube A., Beer J., Papina T., Gaggeler H.W., Schwikowski M. Temperature response in the Altai region lags solar forcing // Geophys. Research Letters. 2009. V. 36. L01808. doi:10.1029/2008GL035930.
16. Hammer C.U. Dating of Greenland ice cores by microparticle concentration analyses // In Isotopes and Impurities in Snow and Ice (Proc. of the Grenoble Symposium). IAHS Publ. № 118. 1977. P. 297–301.
17. Hammer C.U., Clausen H.B., Dansgaard W. Greenland ice sheet evidence of post-glacial volcanism and its climatic impact // Nature. 1980. V. 288. P. 230–235.
18. Jansen E., Overpeck J., Briffa K.R., Duplessy J.-C., Joos F., Masson-Delmotte V., Olago D., Otto-Bliesner B., Peltier W.R., Rahmstorf S., Ramesh R., Raynaud D., Rind D., Solomina O., Villalba R., Zhanget D. Paleoclimate // Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007. P. 433–497.
19. Jones P.D., Briffa K.R., Schweingruber F.H. Tree-ring evidence of the widespread effects of explosive volcanic eruptions // Geophys. Research Letters. 1995. V. 22. № 11. P. 1333–1336.
20. Kurbatov A.V., Zielinski G.A., Dunbar N.W., Mayewski P.A., Meyerson E.A., Sneed S.B., Taylor K.C. A 12,000 year record of explosive volcanism in the Siple Dome Ice Core, West Antarctica // Journ. of Geophys. Research (Atmospheres). 2006. V. 111. № 10. D12307.
21. LaMarche V.C., Hirschboeck K.K. Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions // Nature. 1984. V. 307. P. 121–126.
22. Lamb H.H. Volcanic dust in the atmosphere, with a chronology and assessment of its meteorological significance // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1970. Ser. A. 266. P. 425–533.
23. Lamb H.H. Supplementary volcanic dust veil index assessments // Climate Monitoring. 1977. V. 6. P. 57–67.
24. Lamb H.H. Update of the chronology of assessments of the volcanic dust veil index // Climate Monitoring. 1983. V. 12. P. 79–90.
25. Maraun D., Kurths J. Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls // Nonlin. Processes Geophys. 2004. V. 11. P. 505–514.
26. Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M.,

- Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., Zhao Z.-C.* Global climate projections // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007. P. 747–845.
27. *Mitchell J.M.* A preliminary evaluation of atmospheric pollution as a cause of the global temperature fluctuation of the past century // *Global Effects of Environmental Pollution*. Norwell, Mass, 1970. P. 139–155.
28. *Newhall C.G., Self S.* The volcanic explosivity index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism // *Journ. of Geophys. Research*. 1982. V. 87. P. 1231–1238.
29. *Oliver S.* Atmospheric and climate history of the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai. Inauguraldissertation. Der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern. Bern, den 22.12.2004. 147 p.
30. *Oliver S., Blaser C., Brutsch S., Frolova N., Gaggeler H.W., Henderson K.A., Palmer A.S., Papina T., Schwikowski M.* Temporal variations of mineral dust, biogenic tracers, and anthropogenic species during the past two centuries from Belukha ice core, Siberian Altai // *Journ. of Geophys. Research*. 2006. V. 111. D05309. doi:10.1029/2005JD005830.
31. *Randall D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K.E.* Climate models and their evaluation // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007. P. 589–662.
32. *Robock A.* Volcanic eruption and climate // *Rev. Geophys.* 2000. V. 38. № 2. P. 191–219. doi:10.1029/1998RG000054.
33. *Robock A., Free M.P.* Ice cores as an index of global volcanism from 1850 to the present // *Journ. of Geophys. Research*. 1995. V. 100. P. 11549–11567.
34. *Robock A., Mao J.* The volcanic signal in surface temperature observations // *Journ. Climate*. 1995. V. 8. P. 1086–1103.
35. *Robock A., Free M.P.* The volcanic record in ice core for the past 2000 years // *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years*. Springer–Verlag, New York. 1996. P. 533–546.
36. *Salzer M.W., Hughes M.K.* Bristlecone pine tree rings and volcanic eruptions over the last 5000 years // *Quaternary Research*. 2007. V. 67. P. 57–68.
37. *Sapper K.* Beiträge zur Geographie der tätigen Vulkane // *Zeitschrift für Vulkanologie*. 1917. V. 3. P. 65–197.
38. *Sato M., Hansen J.E., McCormick M.P., Pollack J.B.* Stratospheric aerosol optical depths 1850–1990 // *Journ. of Geophys. Research*. 1993. V. 98. P. 22987–22994.
39. *Simkin T., Siebert L., McClelland L., Bridge D., Newhall C.G., Latter J.H.* Volcanoes of the World. Van Nostrand Reinhold, New York, 1981. 232 p.
40. *Simkin T., Siebert L.* Volcanoes of the World. Geoscience Press, Tucson, Ariz., 1994. 349 p.
41. *Solomina O., Pavlova I., Curtis A., Jacoby G., Ponomareva V., Pevzner M.* Constraining recent Shiveluch volcano eruptions (Kamchatka, Russia) by means of dendrochronology // *Natural Hazards and Earth System Sciences. Special Issue: Tree-ring reconstructions in natural hazards research*. 2008. V. 8. P. 1–15.
42. *Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1998. V. 79. P. 61–78.
43. *Wanner H., Beer J., Bütikofer J., Crowley T.J., Cubasch U., Flückiger J., Goosse H., Grosjean M., Joos F., Kaplan J.O., Küttel M., Müller S.A., Prentice C., Solomina O., Stocker T.F., Tarasov P., Wagner M., Widmann M.* Mid- to Late Holocene climate change: an overview // *Quaternary Science Reviews*. 2008. V. 27. P. 1791–1828.
44. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA (IGBP Pages/World Data Center for Paleoclimatology, Data Contribution Series No. 2000-075). http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/ei/ei_data/volcanic.dat
45. <http://www.pol.ac.uk/home/research/waveletcoherence/>

Summary

In the present research we discuss a role of volcanic activity in Altai thermal regime. Here we analyse the sulfate and temperature data reconstructed from the natural paleoarchive – ice core from the Belukha Mountain saddle. Sulfate ice-core reconstructions can serve as volcanic markers. The both – sulfate and temperature reconstructions – are for the last 750 years. As the characteristic of volcanic activity we consider Volcanic Explosivity Index (VEI), Dust Veil Index (DVI) and Ice core volcanic index (IVI). The analysis was done using wavelet analysis and analysis of wavelet cross coherence and phase. As the result, we conclude that observed increases in the values of the indexes VEI, DVI, IVI basically correspond to decreases of temperature and increases of sulfate concentrations. This confirms the dependence of changes in the thermal regime of the Altai from volcanic activity. But in the 1750–1850 years period there is a delay of the changes in temperature with respect to the changes in volcanic activity. We suggest that it can be due to the superposition of the influence of solar and volcanic activity on changes in the thermal regime of Altai.