

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КОГЕРЕНТНОСТЬ КОЛЕБАНИЙ КОМПОНЕНТОВ ГЛОБАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С МЕДЛЕННЫМИ ФЛУКТУАЦИЯМИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2022 г. О. М. Покровский^а, *, И. О. Покровский^а

^аРоссийский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: pokrov_06@mail.ru

Поступила в редакцию 02.07.2020 г.

Появление обширных данных дистанционного зондирования, атмосферы, океана и криосферы открыло новые возможности для изучения причин и механизмов естественных колебаний климата. Выявлены и исследованы медленные климатические колебания температуры вод поверхностного океанического слоя и для глубин океана до 700 м в северном полушарии как отклик на соответствующие модуляции солнечной активности. Показано, что, учитывая нестационарный характер климатических рядов, наиболее подходящим методом анализа является расчет вейвлет и кросс вейвлет спектров. Обнаружено, что максимумы 11-летних солнечных циклов подчиняются долговременным модуляциям с широким спектром квази-периодичностей, в котором выделяются: интервалы 60–80 летних, а также квази-вековых и квази-двухвековых колебаний. Указанные колебания транслируются также в соответствующие осцилляции глобальной температуры приземного воздуха (ТПВ) и потоков уходящего длинноволнового излучения. Долговременные модуляции с квази-периодом 60–80 лет, которые мы называем, следуя предшествующим исследователям, фундаментальным климатическим колебанием (ФКК), переходят далее внутри климатической системы в выявленные колебания площади ледового и снежного покрытия в северном полушарии, полученных исключительно по данным дистанционного зондирования, сохраняя квазипериодичности, заданные флукутациями солнечной активности. Показано, что в свою очередь ФКК повторяется в рядах спутниковых данных альтиметрических измерений уровня мирового океана. Более того, рост концентрации углекислого газа в атмосфере также подвержен влиянию модуляций солнечной активности, что, вероятно, объясняется вынужденными флукутациями температуры вод океана, который является главным контейнером углерода и CO₂. Таким образом, если говорить о естественных колебаниях климата полувекового, векового и двухвекового масштабов, можно говорить о когерентности таких колебаний, с одной стороны, и осцилляций солнечной активности, как внешнего возмущающего фактора, с другой стороны.

Ключевые слова: климатические колебания, вейвлет анализ, солнечная активность, температура приземного воздуха, температура поверхности океана, температура глубинных вод океана, площадь ледового и снежного покрова, уровень океана, альтиметрия, концентрация CO₂

DOI: 10.31857/S0205961422030083

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих десятилетий исследователи солнечной активности изучали ее колебания. Сначала – на основе регистрации чисел Вольфа, а затем – путем актинометрических измерений на поверхности Земли и с борта космических аппаратов (Кондратьев, 1965; Kondratyev, 1999). Наряду с хорошо известным 11-летним циклом были выявлены полувековые, вековые и двухвековые квази-периодические колебания (Вигинский, 1973; Наговицын, 1997; Хромов, 1973; Gleissberg, 1973). Однако, о трех последних колебаниях обычно говорят как об эмпирических понятиях, поскольку

они не были строго доказаны. Отметим лишь некоторые работы К.Я. Кондратьева, где представлен анализ климатообразующих параметров, доступных для наблюдения из космоса (Кондратьев К.Я., Биненко В.И., 1984; Кондратьев, 1988, Кондратьев, Крапивин 2004). В недавней работе (Dima, et al., 2005) рассматривались взаимосвязи между колебаниями солнечной активности и климатическими индексами на декадном временном масштабе.

Новый математический инструментарий, вейвлет анализ, позволил не только получить более точные и строгие оценки квази-периодичностей солнечной активности, но также выявить реак-

цию температуры поверхности океана (ТПО) на это внешнее воздействие (Покровский, Покровский, 2020). Более того, удалось обнаружить, что в колебаниях климатических рядов ТПО не только в тропической зоне, но и во внетропических широтах Атлантического и Тихого океанов присутствуют аналогичные квази-периодичности, которые наблюдаются в исходном ряду значений солнечной активности (Покровский, Покровский, 2020). Таким образом, формируется концепция климатической системы Земли как сложнейшего нелинейного осциллятора, реагирующего на внешние квазипериодические колебания, главным источником которых является солнечная энергия.

Возникает естественный вопрос, а как другие компоненты климатической системы реагируют на медленные колебания солнечной активности, учитывая наличие многочисленных прямых и обратных связей между этими компонентами. К числу последних относятся: температура атмосферы и различных слоев океана, радиационный баланс и уходящая длинноволновая радиация, атмосферные осадки, площадь арктических льдов и снежного покрова, уровень Мирового океана, концентрация углекислого газа в атмосфере. Цель данной работы состоит в изложении результатов наших исследований для получения ответов на поставленный вопрос.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Большая часть использованных данных получена с привлечением спутниковых данных дистанционного зондирования в трех средах: атмосфера, гидросфера и криосфера. В связи с происходящими климатическими изменениями ключевым параметром считается температура атмосферного воздуха. Несколько мировых центров подготавливают ряды температур приземного воздуха (ТПВ) или surface air temperature (SAT) – в английском оригинале. Наиболее широко используются американские и британские массивы данных. Уточненные ряды глобальной температуры воздуха CRUTEM-3, 4, 5 даны на сайте британского климатического центра MetOffice университета восточной Англии (<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/>) и описаны в работе (Brohan, et al., 2006; Jones, et al., 2012). Одновременно использовались комбинированные данные SAT и SST (температура поверхности океана) (Morice, et al., 2012). Эти архивы называются HadCRUT 4 и 5. Методики получения и обработки данных для британских климатических архивов представлены в работе (Rayner, et al., 2003).

Для изучения средней температуры слоев океана от поверхности до глубин 700 и 2000 м ис-

пользовался климатический архив температур и теплоемкостей, представленный на сайте NODC (National Oceanographic Data Center) США, в разделе http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/.

Массив данных по уходящей длинноволновой радиации (УДР) описан в работе (Liebmann, Smith, 1996). Глобальные и региональные данные заимствованы с сайта https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.interp_OLR.html.

Климатические ряды месячных и среднегодовых значений площади снежного покрова в северном полушарии были заимствованы из данных NOAA США (<https://psl.noaa.gov/thredds/catalog/Datasets/snowcover/>), а месячные и годовые спутниковые данные по площади арктического льда в Северном Ледовитом океане из архивов Национального ледового Центра США (<https://nsidc.org/data/g02135>).

Архивы альтиметрических спутниковых изменений уровня океана, начиная с 1993 г., представлены на сайте океанической лаборатории университета Колорадо (США) (<http://sealevel.colorado.edu/>). Авторы статьи (Church, White, 2011) добавили к указанному архиву значения, реконструированные за предшествующие 113 лет. Они основаны на данных инструментальных измерений береговой сети.

Длинные ряды концентрации углекислого газа в атмосфере также имеются на многих порталах. Например, (Historical CO₂ data, 2018). Анализ данных приведен в работе (Etheridge, et al, 1996). Однако, из-за косвенного характера таких данных, наиболее надежными являются инструментальные измерения концентрации CO₂, полученные начиная с 1958 г. по настоящее время на фоновой станции Мауно-Лоа (Keeling, et al, 1976). Данные можно найти, например, на сайте NOAA <ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/>.

Остановимся на методике анализа климатических данных. В соответствии с принятым общим подходом при анализе нестационарных рядов сначала вычисляется линейный тренд, который затем вычитается из исходного ряда. В предыдущей работе (Покровский, 2010) был предложен метод сглаживания нестационарных рядов наблюдений, который позволил выявить согласованные медленные колебания основных климатических индексов. Для независимого подтверждения полученных результатов целесообразно применить спектральный метод анализа. Именно вейвлет анализ позволяет оперировать с нестационарными рядами в отличие от классического Фурье анализа. Вейвлет анализ в науках о Земле предназначен для спектрального анализа как локальных (по временной координате), так и глобальных вариаций амплитуд климатических рядов (Torrence and Compo, 1998). После преобразования временных рядов в частотно-временную

область данный метод позволяет выявить максимальные значения спектральных амплитуд, локализованные по временной оси, по годам, для определенных важнейших квази-периодичностей (квази-частот) климатических рядов. Формулы преобразования одномерного ряда в двумерный частотно-временной образ и соответствующий вычислительный алгоритм даны в работе (Torrence and Compo, 1998), а для климатических приложений, также в (Покровский, 2010). Два свойства вейвлетов определяют их преимущества по отношению к другим спектральным методам, например, Фурье анализу (Jenkins, and Watts, 1968). Первое – любой вертикальный разрез двумерного вейвлет спектра пропорционален одномерному преобразованию Фурье для данного момента времени. Таким образом, вейвлет выявляет нестационарность климатических рядов в количественной форме. Второе – интервал детектируемых периодичностей получаемого спектра может в 4 раза превышать длину используемого временного ряда (Daubechies, 1990).

В заключение этой части отметим, что нами используются вейвлеты с функцией преобразования Морли (Daubechies, 1990) на основе алгоритма (Torrence and Compo, 1998). Для того, чтобы повысить надежность полученных выводов нами параллельно проводились расчеты также и по альтернативной схеме расчетов вейвлет спектров, изложенной в (Grinsted, et al, 2004).

ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ РЯДОВ

Обычный корреляционный анализ климатических рядов не дает удовлетворительных результатов в виду того, что исследуемые ряды являются нестационарными. Когерентность вейвлет-преобразования используется для нахождения меняющихся корреляций между сигналами. Чаще всего когерентность вейвлета используется для нахождения коррелированных областей между сигналами, которые не коррелируют большую часть времени. Метод WTC (wavelet transform coherence) (Grinsted, et al., 2004) предоставляет информацию о силе взаимосвязи в виде частотно-временной карты. Таким образом, соответствующие характеристики сигнала могут быть получены в определенных частотных зонах и временных точках. Желаемое разрешение может быть получено одновременно для каждой характеристики сигнала: более высокое временное разрешение для более высоких частот и более высокое пространственное разрешение для более низких частот.

В предшествующей работе (Покровский, Покровский, 2020) мы сопоставляли вейвлет спектры для разных климатических рядов. Теперь мы переходим к анализу на основе технологии WTC (Grinsted, et al., 2004), которая позволяет количе-

ственно оценить временные и частотные области, где наблюдаются существенные связи колебаний климатических рядов. Более того, что не менее важно, имеется возможность оценить фазовые сдвиги, характеризующие временные лаги при сопоставлении колебаний рядов.

Поскольку мы предполагаем, что источником колебаний климатической системы являются флуктуации солнечной активности, начнем с анализа кросс-вейвлет спектра рядов чисел Вольфа и индекса температуры поверхности Тихого океана в тропиках Niño 1.2. Именно тропическая зона Тихого океана поглощает наибольшую долю приходящей солнечной энергии. Здесь же имеет место феномен Эль-Ниньо и берет начало глобальный океанический конвейер. WTC спектр представлен на рис. 1, а. Области, где оценки имеют 5%-ый уровень статистической значимости выделены сплошными линиями черного цвета. Кроме изолиний, указывающих нормированные значения, можно видеть множество стрелок, направления которых дает информацию о фазовых сдвигах. Они дают представления о временных лагах между рядами (Grinsted, et al., 2004). Направление по горизонтали слева направо означает синфазность колебаний обоих рядов, обратное направление – противофазность. Направление вниз означает сдвиг по фазе на 90° , вверх – на 270° . Перевод во временные лаги осуществляется для каждой периодичности отдельно.

На рис. 1, а выделяется 2 области периодичностей: малых значений 2–4, 8–11 лет и больших значений 60–65 лет. Первые отражают колебания в зоне Эль Ниньо, генерированные 11-летним циклом солнечной активности SSN, вторые – фундаментальное климатическое колебание (ФКК) (Покровский, Покровский, 2020). То, что стрелки параллельно направлены слева направо внутри области ФКК указывает, что медленные колебания солнечной активности SSN находятся в согласованной фазе с генерированными флуктуациями температуры океана в зоне Эль Ниньо. В короткопериодных областях такой синфазности не наблюдается. Для других индексов Эль Ниньо наблюдается сходная связь с рядом SSN. Также обнаружено, что ФКК транслируется из последовательности значений индексов Эль Ниньо в соответствующее колебание декадной тихоокеанской осцилляции (PDO). Тесная связь обнаруживается между колебаниями ТПО в двух океанах Тихом и Атлантическом. Кросс вейвлет анализ рядов PDO и АМО выявил не только полноценную трансляцию ФКК из одного океана в другой, но позволил оценить фазу запаздывания, составляющую 16–17 лет, что согласуется с результатами ряда работ.

На рис. 1, б представлены результаты кросс-вейвлет анализа между рядами солнечной актив-

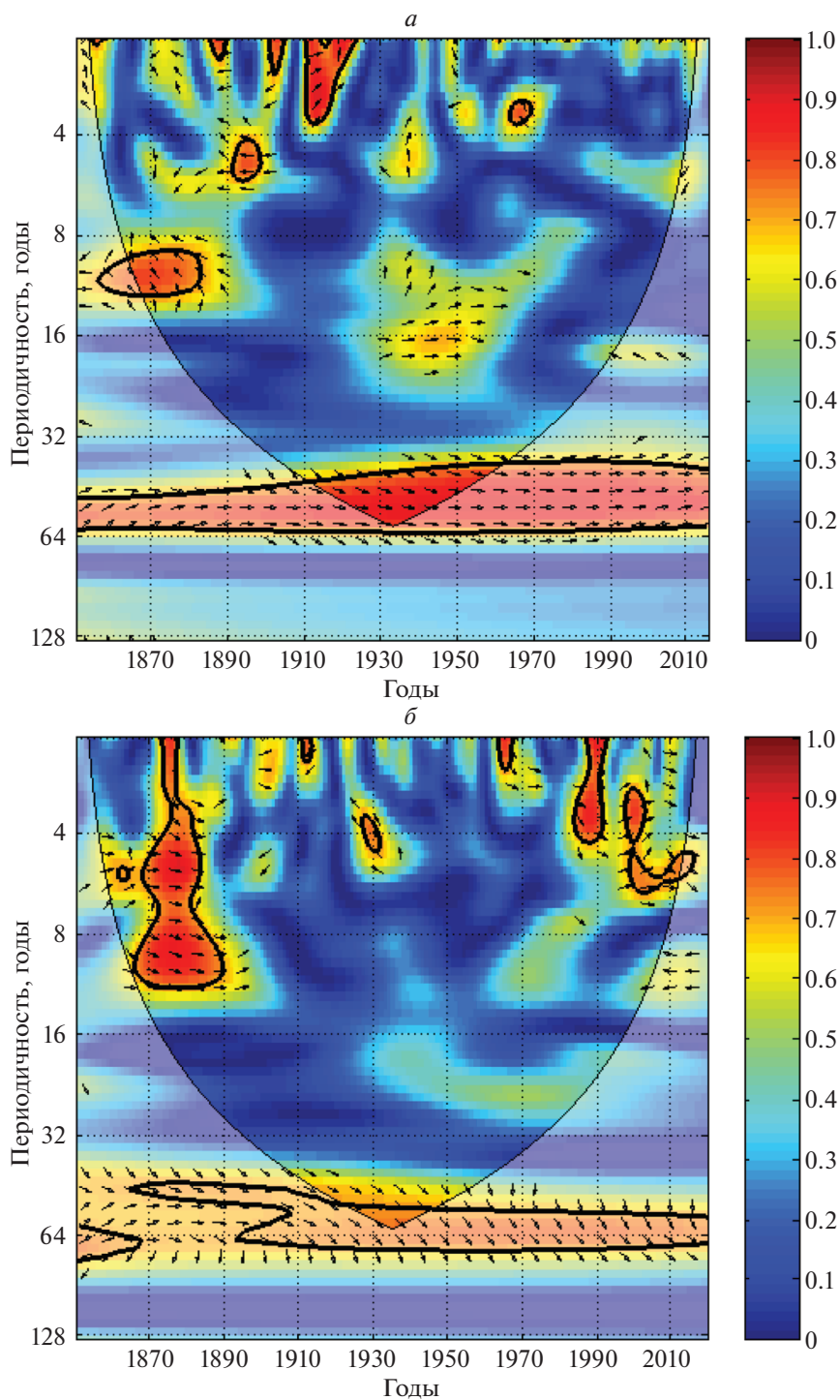


Рис. 1. Карта вейвлет когерентности между стандартизованными временными рядами: *a* – солнечной активности SSN и Nino 1,2; *б* – солнечной активности SSN и годовой температуры поверхности океана и приземного воздуха HadCRUT 5 (северное полушарие). Области с уровнем значимости 5% относительно “броуновского шума” выделены черными линиями. Почти все статистически значимые области показывают согласованное направления стрелок и одинаковое поведение в частотно-временном пространстве.

ности и аномалий средней годовой температуры поверхности океана и приземного воздуха во всем северном полушарии HadCRUT 5. Основные чер-

ты приводимой карты сохраняются. Те же области малых и больших периодичностей. Область периодичности около 64 лет ФКК отличается

тем, что стрелки фазового сдвига направлены почти вниз. Это означает, что соответствующий временной лаг составляет 7–8 лет. Именно с такой задержкой температура поверхности океана и приземного воздуха в северном полушарии в среднем реагирует на медленные флуктуации солнечной активности. Аналогичные расчеты были проведены для других пар климатических рядов.

Их результаты показывают, что ФКК транслируется в большинстве из них. Ограничение объема работы не позволяют привести все карты кросс вейвлет анализа.

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА НА ПРИЛЕЖАЩИЙ СЛОЙ АТМОСФЕРЫ

На первой стадии исследования (Покровский, Покровский, 2020) были выявлены 4 зоны квазипериодических колебаний (КПК): 1) 11-летняя, 2) 60–80 летняя, 3) 110–120 летняя и 4) 230–250 летняя. Эти зоны по-разному проявились в спектрах солнечной активности и ТПО в тропиках и в умеренных широтах северного полушария. Первая зона КПК локализуется по временной оси и некоторым образом связана с явлением Эль-Ниньо, вторая – с медленным колебанием амплитуд 11-летнего солнечного цикла и проявляется в фундаментальном климатическом колебании ТПО, третья и четвертая – с вековыми колебаниями солнечной активности (Gleissberg, 1973).

Первоначально мы исследовали спектр рядов ТПО для северного полушария и глобального масштаба. Результаты оказались сходными с теми, что были получены в предыдущей работе. После этого мы перешли к анализу соответствующих рядов температуры атмосферного воздуха над сушей. Существует уже 4 версии рядов CRUTEM-1, 2, 3, 4, созданные за разные годы, начиная с 1999 г. Версия CRUTEM-3 подверглась переработке после известного кризиса CLIMATE-GATE 2008 г. на всемирной климатической конференции в Копенгагене. Следующая версия CRUTEM-4 считается наиболее надежной до настоящего времени и используется большинством специалистов. Максимальные расхождения между 3-ей и 4-ой версиями достигает 1°C в интервале 1880–1900 гг., что сопоставимо со всем глобальным потеплением за весь 20-й век. При этом минимум глобальной температуры в конце 19-го–начале 20-го века, присутствующий во всех более ранних версиях, исчез в 4-й версии.

На рис. 2, а представлен вейвлет спектр для ряда CRUTEM-3, полученный по алгоритму (Torrence and Compo, 1998). На нем представлены все ранее обсуждавшиеся аномальные зоны спек-

тральной плотности вейвлета (СПВ). На рис. 2, б представлен вейвлет спектр для ряда CRUTEM-3, полученный по алгоритму (Grinsted, et al, 2004). Черными кривыми выделены области со статистической значимостью, отвечающей вероятности более 95%. На рис. 2, а используется шкала отрицательных и положительных степеней числа 2, а на рис. 2, б соответствующие дроби и целые числа. Таким образом, локализация аномалий СПВ и их значения, полученные двумя независимыми алгоритмами, хорошо согласуются и приводят к одинаковым выводам относительно того, что глобальная температура атмосферного воздуха подчиняется колебаниям внешней возмущающей силы – солнечной активности (Покровский, Покровский, 2020). Все последующие результаты получены проверкой на обоих независимых алгоритмах и поэтому заслуживают доверия.

Аналогичны е исследования были проведены для климатических рядов HadCRUTEM-3,4 для объединения ТПО и температуры воздуха над сушей. Глобальные значения и те, которые соответствуют наблюдениям в северном полушарии, дают сходные результаты из-за того, что объем наблюдений в южном полушарии стал значительным лишь в последние столетия. Ход аномалий HadCRUTEM-4 (рис. 3, а) демонстрирует наличие медленных колебаний глобальной температуры с периодом порядка 60–80 лет. Данные рис. 3, б подтверждают и детализируют информацию о медленных колебаниях в трех упомянутых ранее временных интервалах. Зоны максимальных значений СПВ, выделенные черными кривыми, статистически значимы с вероятностью 95%.

Одним из первых, измеряемых со спутника, климатическим параметром был поток уходящего длинноволнового излучения, регистрируемого в “окне прозрачности” атмосферы 8–12 мкм. К настоящему времени данные многочисленных спутников систематизированы, проконтролированы (для исключения грубых погрешностей) и проинтерполированы по временной и пространственным координатам (Liebmann, and Smith, 1996). Это позволило получить соответствующие региональные и глобальные климатические ряды. Из физических соображений (Кондратьев, 1988) следует, что величина потока уходящего длинноволнового излучения определяется радиационной температурой подстилающей поверхности (океан, суша). Поэтому неудивительно, что конфигурация климатического ряда и соответствующего вейвлет спектра повторяет основные черты графиков и рисунков для архива HadCRUTEM объединения ТПО и температуры воздуха над сушей. Роль облачности в радиационном балансе Земли известна (К). В этой связи стоит напомнить еще один факт. В недавней работе (Покровский, 2019) показано, что динамика глобального

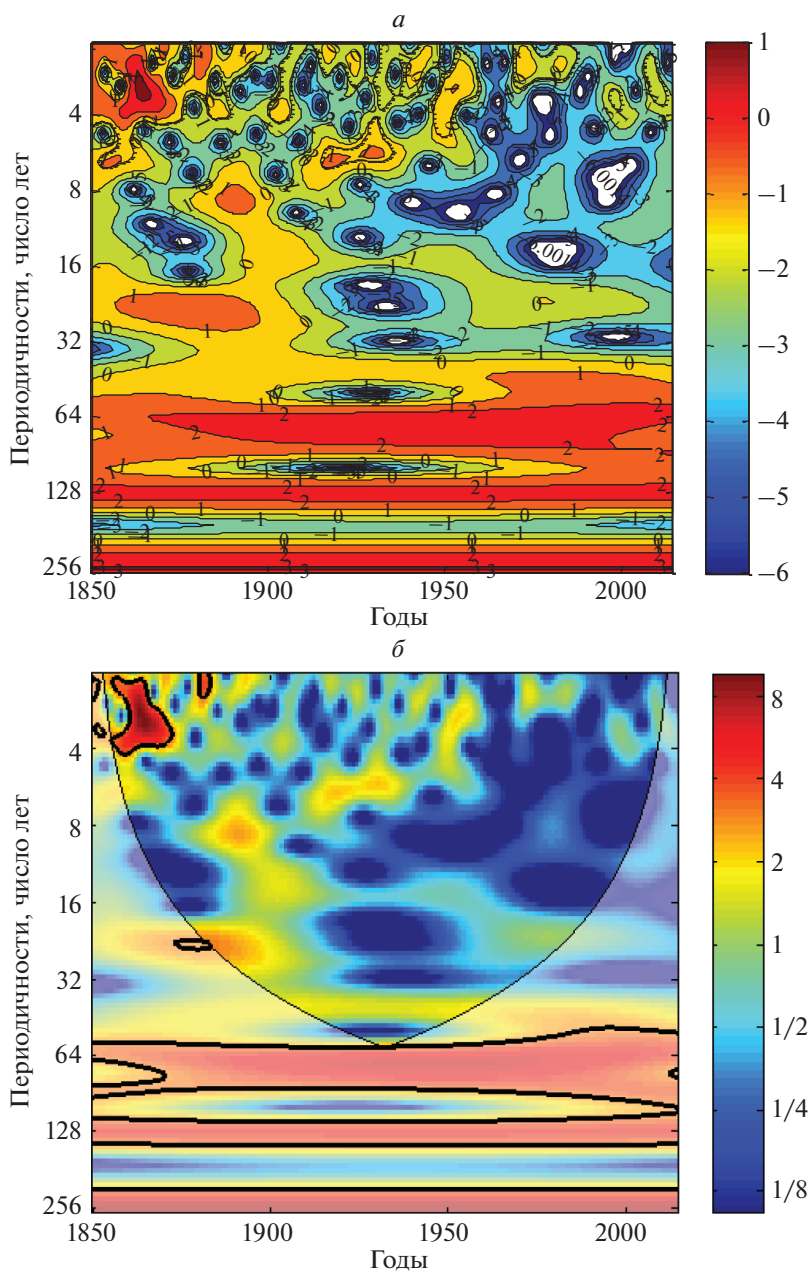


Рис. 2. Вейвлет анализ климатического ряда аномалий среднегодовых значений глобальной температуры приземного воздуха CRUTEM-3 (Brohan, et al., 2006): *a* – алгоритм (Torrence and Compo, 1998); *б* – алгоритм (Grinsted, et al., 2004). Зоны максимальных значений, выделенные черными кривыми, статистически значимы с вероятностью 95%.

количества облаков и значений облачного покрытия над Мировым океаном также демонстрируют наличие отмеченных выше квази-периодических колебаний.

Таким образом, колебания солнечной активности через нагрев поверхности океана передаются к приземному слою атмосферы и определяют осцилляции климата на Земле. Перенос тепла в водной среде осуществляется не столь прямолинейно. Большой удельный вес, теплоемкость и

плотность воды влечет за собой сложную систему циркуляции, включая сеть поверхностных и глубинных океанических течений.

ТЕМПЕРАТУРА ВОД В ГЛУБИННЫХ СЛОЯХ ОКЕАНА

В прошедшие десятилетия расширились исследования Мирового океана с помощью различных средств наблюдений. Кроме стационарных и маршрутных судовых наблюдений появилась и

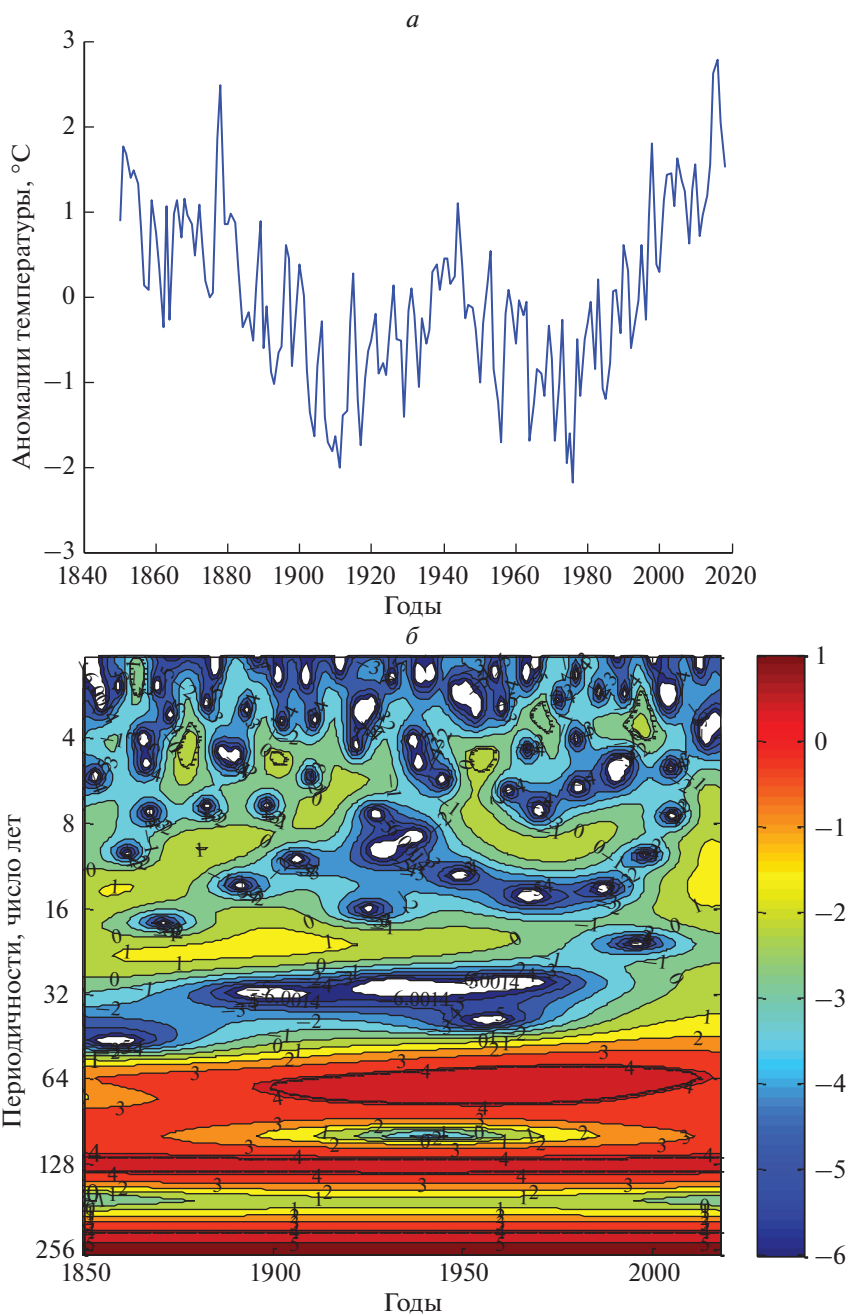


Рис. 3. Анализ климатического ряда аномалий глобальных значений HadCRUT 3.4 для объединения ТПО и температуры воздуха над сушей: *а* – временной ряд аномалий годовых значений; *б* – вейвлет спектр.

стала доминирующей сеть буйковых автоматических станций, осуществляющих регулярные глубинные зондирования и передающих информацию через спутники связи. Осуществляется ряд международных проектов, включая крупнейший и наиболее продолжительный проект ARGO (Argo Steering Team, 1998). Флот ARGO состоит из почти 4000 буев. Исследования на основе полученных измерений, в частности, позволили получить климатические ряды средней температуры

верхнего слоя океана в интервалах глубин 0–700 и 0–2000 м (Levitus, et al, 2012). Эти данные детализированы для северной части Атлантического и Тихого океанов, оказывающих доминирующее влияние на формирование климата Евразии и Северной Америки.

Мы рассмотрели 3 ряда данных средних температур в обоих интервалах глубин за 1955–2019 гг.: 1) Северная Атлантика, 2) северная часть Тихого океана, 3) Мировой океан. Анализ показывает,

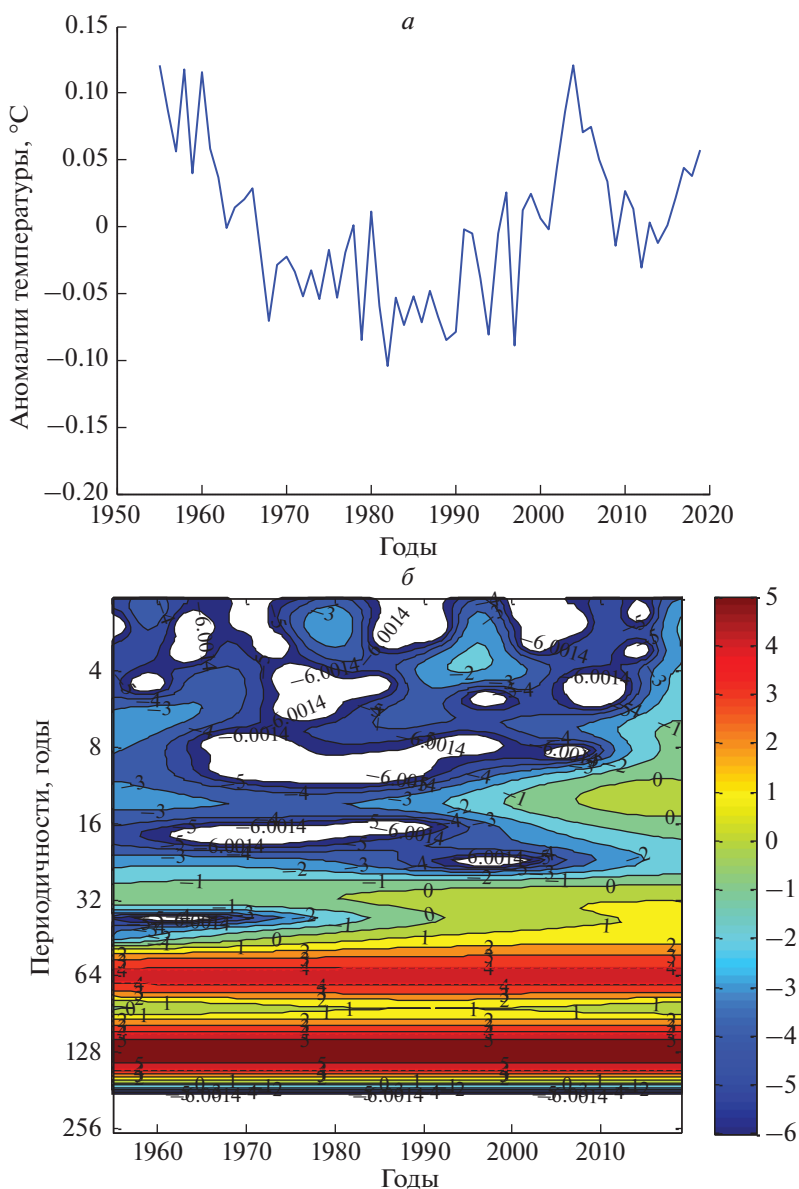


Рис. 4. Анализ климатического ряда аномалий средней температуры глубинных вод (0–700 м) в Северной Атлантике (Levitus, et al., 2012): *a* – временной ряд аномалий годовых значений; *б* – вейвлет спектр.

что ввиду существенного доминирования числа наблюдений в 1-м регионе по сравнению со 2-м регионом обнаруживается близость графиков для аномалий средних температур в 1-м и 3-м регионах. Аномалии средней температуры глубинных вод (0–700 м) в Северной Атлантике (рис. 4, *a*) “запаздывают” по фазе примерно на 18 лет по отношению к северной части Тихого океана. Этот феномен отмечался ранее при регрессионном анализе рядов для поверхностных вод (Покровский, 2019). Это лишний раз подтверждает справедливость теории “глобального конвейера” в Мировом океане (Brocker, 1985). Согласно ей вре-

мя перемещения макромасштабных глубинных масс воды из Тихого в Атлантический океан и обратно составляет несколько десятилетий.

Несмотря на то, что длина рядов средней температуры глубинных вод океана составляет около 65 лет, вейвлет анализ позволяет выявить периодичности большего временного масштаба. Данные рис. 4, *б* показывают, что вейвлет анализ уверенно (с 95% вероятностью) воспроизводит две долгопериодные аномалии спектральной плотности 60–80 лет и 110–130 лет. Влияние 11-летнего цикла и связанного с ним феномена Эль-Ниньо не обнаруживается в колебаниях температур

глубинных вод не только в Атлантическом, но и в Тихом океане. И только медленные модуляции экстремумов солнечной активности оказывают воздействие на колебания температуры глубинных вод.

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И МОРСКОЙ ЛЕД

Основным источником пополнения вод океана являются осадки, количество которых зависит от скорости испарения, которая определяется температурой водной поверхности. В работе (Покровский, 2019) исследованы ряды глобальной облачности и осадков, которые демонстрируют медленные колебания, сходные с описанными выше. Потепление климата повлекло за собой сокращение площади снежного и ледового покрова. В 20-м веке накоплена информация о площади льда в шельфовых российских арктических морях (Polyakov, Johnson, 2000; Polyakov, et al., 2003). Анализ климатических рядов (Pokrovsky, 2009) выявил наличие медленных 60–80 летних колебаний площади льда в Баренцевом, Карском, Чукотском морях и море Лаптевых.

Начиная с 1979 г., появляются спутниковые оценки площади ледового покрытия всей акватории Арктики. На рис. 5, а представлен график значений аномалий (отклонений от линейного тренда) среднегодовой площади ледового покрытия Северного Ледовитого океана за 1979–2019 гг. Можно выделить 3 периода изменений этой характеристики: 1) быстрое сокращение площади льда в 80-е годы, 2) стабильное уменьшение в 90-е годы, и 3) замедление этого процесса в начале 21-го века, за исключением отдельных лет. Это обстоятельство указывает на нестационарность данного процесса. Поэтому неудивительно, что вейвлет спектр указанного временного ряда (рис. 4, б) демонстрирует наличие медленного климатического колебания, располагающегося в интервале 60–80 лет. Это колебание статистически значимо с вероятностью 95%. Отметим, что в работах (Polyakov, Johnson, 2000; Pokrovsky, 2009) на базе 100-летнего климатического ряда для российских шельфовых морей (Баренцево, Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское) за весь 20-й век также обнаруживалось указанное колебание. Это означает, что влияние модулированного колебания солнечной активности сказывается даже на климатические изменения в Арктике.

Аналогичное исследование было проведено для общей площади снежного покрова северного полушария. Соответствующий архив климатических данных описан в работе (Robinson, et al., 2012). Там же изложена методика обработки комбинации наземных и спутниковых данных и получения климатических рядов за зимние сезоны на период, начиная с 1967 г. Динамика изменения аномалий (отклонений от линейного тренда)

среднегодовой площади снежного покрова позволяет отметить следующие особенности: 1) ускоренное сокращение площади в 70-е годы и в начале 80-х годов; 2) стабильное замедляющееся сокращение, начиная с 90-х годов. Вейвлет спектр указанного временного ряда обнаруживает наличие двух медленных климатических колебаний, располагающихся в интервалах 60–80 лет и 110–130 лет. Кроме того, в период 1967–1998 гг. обнаруживается статистически значимое колебание с периодичностью 6–8 лет, что косвенно указывает на вероятную роль Эль-Ниньо в межгодовых колебаниях площади снежного покрова.

ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ МИРОВОГО ОКЕАНА И КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

В современных климатических исследованиях невозможно обойти эту тему (Кондратьев, Крапивин, 1988). Связь этих процессов очевидна. Подъем уровня Мирового океана влечет за собой увеличение площади соприкосновения атмосферы и океана. С другой стороны, это приводит к увеличению газообмена между этими двумя средами. А согласно результатам многочисленных работ (см. сводку в Sorensen, 1979), а также доля обмена углекислым газом между атмосферой и океаном достигает 80% в общем балансе CO_2 в атмосфере (Кондратьев, Крапивин, 1988). Таким образом, подъем уровня океана неизбежно приводит к изменению концентрации CO_2 в атмосфере за счет естественных источников и стоков в океане.

Подъем уровня океана, начиная с 1993 г., обнаруживается по альтиметрическим спутниковым измерениям. На графике аномалий (отклонения от линейного тренда) среднегодовых значений уровня океана (не представлен) обнаруживается отрицательная аномалия в 2006–2014 гг. с минимумом в 2011 г., составляющим около 6 мм. Вейвлет спектр (рис. 6, а) обнаруживает фундаментальное колебание процесса подъема уровня океанических вод в интервале периодичностей 60–80 лет. Наряду с ним выявляется более слабая квазипериодичность, имеющая полупериод около 30 лет.

Учитывая, что наиболее интенсивным является обмен углекислым газом между атмосферой и океаном (Кондратьев, Крапивин, 2004), а с подъемом уровня мирового океана площадь его поверхности возрастает, неудивительно, что колебания обеих характеристик меняются когерентно. Это видно из данных рис. 6, а и 6, б. Напомним, что интервал детектируемых периодичностей получаемого вейвлет спектра может в 4 раза превышать длину используемого временного ряда (Daubechies, 1990). Альтиметрические данные ис-

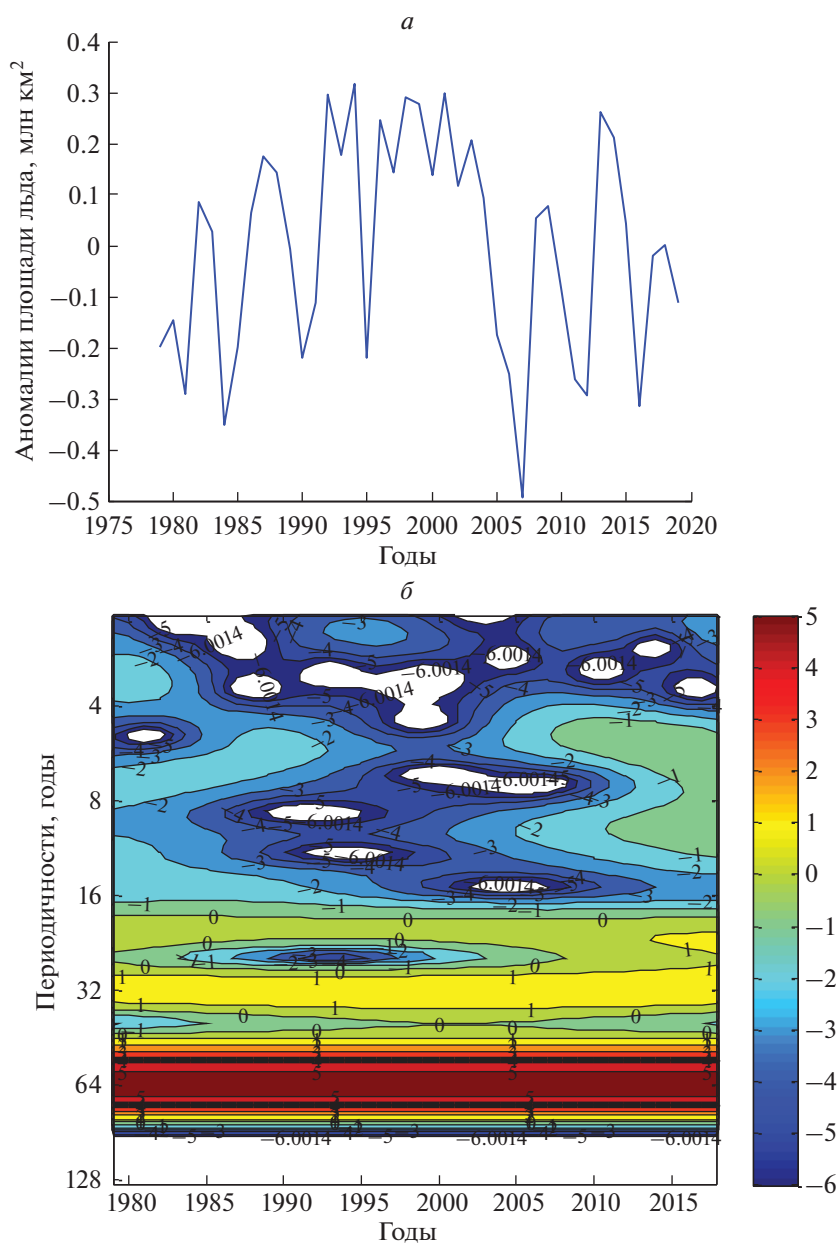


Рис. 5. Анализ климатического ряда аномалий среднегодовой площади ледового покрытия акватории Северного Ледовитого океана по данным спутниковых наблюдений с 1979 г.: *а* – временной ряд стандартизованных аномалий годовых значений; *б* – вейвлет спектр.

пользовались за 30 лет, а измерения концентрации CO_2 – за 65 лет.

Мы ограничились рассмотрением климатического ряда среднегодовых концентраций CO_2 , полученных из измерений на фоновой станции Мауно-Лоа, начиная с 1958 г. Аномалии временного ряда аномалий (отклонений от линейного тренда) имеют положительный знак везде, кроме интервала 1970–2005 гг., где отрицательная аномалия достигает почти 5 ppm. Соответствующий вейвлет спектр (рис. 6, б) выявляет фундамен-

тальное колебание в интервале 60–80 лет и вековую гармонику, локализованную в интервале 110–130 лет. Океан поглощает CO_2 , являясь его основным стоком. И скорость этого поглощения согласно закону Генри о зависимости растворимости газов определяется поверхностной температурой океана.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все представленные результаты расчетов вейвлет спектров проверялись с помощью парал-

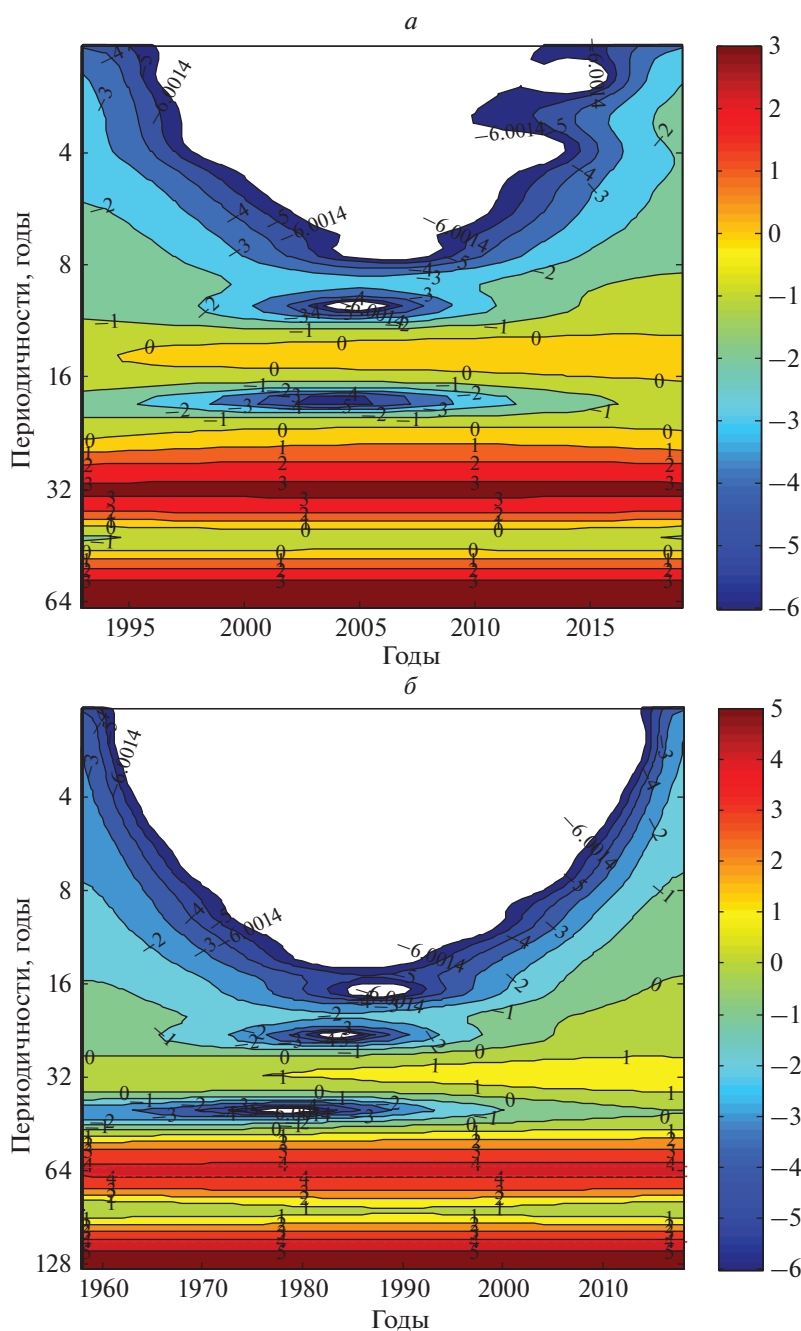


Рис. 6. Вейвлет анализ климатических рядов аномалий среднегодовых значений: *a* – уровня мирового океана (спутниковая альтиметрия) *б* – концентрации CO_2 (станция Мауно-Лоа).

лельных вычислений по обоим алгоритмам (Grinsted, et al., 2004; Torrence, Compo, 1998), что исключает вероятность ошибки. Они привели к идентичным выводам для всех рассмотренных климатических параметров и временных интервалов. Содержательные выводы, отмеченные выше, подводят нас к заключению, что скрытые квазипериодические колебания (после исключения линейного тренда) солнечной активности

транслируются в соответствующие колебания основных компонентов климатической системы (океан, атмосфера, криосфера), а затем проявляются в изменениях производных параметров (уровень океана, глобальная облачность, концентрация CO_2 , потоки длинноволновой радиации, площадь арктического льда). Исключение линейного тренда позволяет удалить влияние перехода от одной климатической эпохи (с масштабом

многих тысячелетий) к другой. Только применение современного аппарата спектрального анализа за нестационарных климатических рядов позволило выявить их скрытые квазипериодичности, и их согласованность с колебаниями солнечной активности. Возможности использования данных дистанционного зондирования космических аппаратов позволили более глубоко исследовать причины и механизмы происходящих изменений климата.

Таким образом, если говорить о естественных колебаниях климата полувекового, векового и двухвекового масштабов, можно говорить о когерентности таких колебаний, с одной стороны, и осцилляций солнечной активности, как внешнего возмущающего фактора, с другой стороны. Но этот вопрос требует дальнейшего изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вигинский Ю.И.* Цикличность и прогнозы солнечной активности. JL: Наука. 1973, 275. с.
- Кондратьев, К.Я.* Актинометрия. — Л.: Гидрометеиздат, 1965. 690 с.
- Наговицын Ю.А.* Нелинейная математическая модель солнечной цикличности и возможности для реконструкции активности в прошлом // Письма в Астрон. Журнал. 1997 Т. 23. № 11–12. С. 859–862.
- Кондратьев К.Я.* Актинометрия // Л. Гидрометеиздат, 1965, 327 с.
- Кондратьев К.Я.* Радиационные факторы современных изменений глобального климата / Л.: Гидрометеиздат, 1980. 279 с.
- Кондратьев К.Я., Биненко В.И.* Влияние облачности на радиацию и климат // Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
- Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф.* Моделирование глобального круговорота углерода // М., ФизМатЛит, 2004, 336 с.
- Покровский О.М.* Анализ факторов изменения климата по данным дистанционных и контактных измерений // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 5. С. 11–24.
- Покровский О.М.* Изменение облачности в период глобального потепления по результатам международного спутникового проекта // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 1. С. 3–13.
- Покровский О.М., Покровский И.О.* Идентификация фундаментального климатического колебания с помощью вейвлет анализа рядов наблюдений. // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 6. С. 57–72.
- Хромов С.П.* О некоторых спорных вопросах, относящихся к цикличности солнечной активности и ее предполагаемым связям с климатом // Метеорология и Гидрология. 1973. № 9. С. 93–98.
- Argo Steering Team.* On the design and Implementation of Argo — an initial plan for the global array of profiling floats // International CLIVAR Project Office Report, 1998, 21. P. 32.
- Broecker W.S., Peteet D.M., Rind D.* Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? // Nature, 1985. V. 315. P. 21–26.
- Church J.A., White N.J.* Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. // Survey Geophysics, 2011. V. 32. 585–602.
- Daubechies, I.* The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis. // IEEE Trans. Inform. Theory. 1990. V. 36. P. 961–1004.
- Dima M.G., Lohmann, Dima I.* Solar-induced and internal climate variability at decadal time scales // Int. J. Climatol. 2005. V. 25. P. 713–733.
- Etheridge D.M., Steele L.P., Langenfelds R.L., Francey R.J., Barnola J.-M., Morgan V.I.* Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn // J. Geophys. Res., 1996. V. 101 (D2), P. 4115–4128.
<https://doi.org/10.1029/95JD03410>
- Jenkins G.M., Watts D.G.* Spectral Analysis and Its Applications // Holden-Day, 1968. 525 p.
- Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J., Harpham C., Salmon M., Morice C.P.* Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010. // J. Geophysical Research. 2012. V. 117. D05127.
<https://doi.org/10.1029/2011JD017139>
- Gleissberg W.* Revision of the probability laws of sunspot variations // Frankfurt (M.): Astronom. Inst., 1973, 246 p.
- Grinsted A., Moore I J.C., Jevrejeva S.* Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // Nonlinear Processes in Geophysics, 2004. V. 11 P. 561–566.
- Keeling C.D., Bacastow R.B., Bainbridge A.E., Ekdahl C.A., Guenther P.R., Waterman L.S.* Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii // Tellus. V. 28. P. 538–551.
- Kondratyev, K. Ya.,* Climatic Effects of Aerosols and Clouds // Springer Praxis Books, 1999, 264 p.
- Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Baranova O.K., Garcia H.E., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Reagan J.R., Seidov D., Yarosh E.S., Zweng M.M.* World ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m) 1955–2010 // Geophys. Res. Lett., 2012. V. 39. L10603.
<https://doi.org/10.1029/2012GL051106>
- Liebmann B., Smith C.A.* Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. V. 77. P. 1275–1277.
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A., Jones P.D.* Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 dataset // J. Geophysical Research, 2012. V. 117. D08101.
<https://doi.org/10.1029/2011JD017187>
- NH ice extent and area from <http://nsidc.org/data/g02135.html> [million km²] area covered with at least 15% ice.
- Pokrovsky O.M.* A coherency between the North Atlantic temperature nonlinear trend, the eastern Arctic ice extent drift and change in the atmospheric circulation regimes over the northern Eurasia. In a book “Influence of Climate Change and Sub-Arctic Conditions on the Changing Arctic” (Ed. J.C.J. Nihoul, A.G. Kostianoy) // Springer Science Publ., 2009. P. 25–36.

Polyakov I., Johnson M.A. Arctic decadal and interdecadal variability // *Geophys. Res. Lett.*, 2000. V. 27. P. 4097–4100.

Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V. Long-Term Ice Variability in Arctic Marginal Seas // *J. Climate*, 2003. V. 16. P. 2078–2075.

Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan, A. (2003) Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № D14. 4407. <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>

Robinson D.A., Estilow T.W., NOAA CDR Program (2012): NOAA Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE), Version 1. Northern Hemisphere. // NOAA National Centers for Environmental Information.

<https://doi.org/10.7289/V5N014G9>

Sorensen B. Renewable Energy., N.Y. Academic Press, 1979, 682 p.

Trenberth K.E., Paolino D.A. The Northern Hemisphere Sea-Level Pressure Data Set: Trends, Errors and Discontinuities // *Mon. Wea. Rev.*, 1980. V. 108. P. 855–872.

Torrence C., Compo G. A practical guide to wavelet analysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998. V. 79. P. 61–78.

Coherence of Fluctuations of Components of the Global Climate System with Slow Fluctuations of Solar Activity According to Conventional and Satellite Observations

O. M. Pokrovsky¹ and I. O. Pokrovsky¹

¹*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia*

Slow climatic fluctuations of water temperature in the surface ocean layer and for the ocean depths up to 700 m in the Northern Hemisphere as a response to the corresponding modulations of solar activity were identified and studied. It is shown that, given the non-stationary nature of climate series, the most suitable method of analysis is the calculation of wavelet spectra. It was found that the maxima of 11-year solar cycles are subject to long-term modulations with a wide range of quasi-periods, in which the intervals of 60–80 years, as well as quasi-century and quasi-two-century fluctuations are distinguished. These fluctuations are also translated into corresponding oscillations of the global surface air temperature (SAT) and outgoing long-wave radiation (OLR) fluxes. Long-term modulations with a quasi-period of 60–80 years, which we call, following previous researchers, the fundamental climate oscillation (FCC), pass further within the climate system into the detected fluctuations in the area of ice and snow cover in the Northern Hemisphere, obtained exclusively from remote sensing data, while maintaining the quasi-periods set by fluctuations in solar activity. It is shown that, in turn, the FCC is repeated in the series of satellite data of altimetric measurements of the world ocean level. Moreover, the increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere is also affected by modulations of solar activity, which is probably due to forced fluctuations in the temperature of the waters of the ocean, which is the main container of carbon and CO₂. Thus, if we talk about natural climate fluctuations of half-century, century and two-century scales, we can talk about the coherence of such fluctuations, on the one hand, and solar activity oscillations, as an external disturbing factor, on the other hand.

Keywords: climate fluctuations, wavelet analysis, solar activity, surface air temperature, ocean surface temperature, ocean deep water temperature, ice and snow cover area, ocean level, altimetry, CO₂ concentration

REFERENCES

Viginsky Yu.I. Tsiklichnost i prognozyi solnechnoy aktivnosti. [Cyclicity and forecasts of solar activity]. L: Nauka. 1973. 275 p. (In Russian)

Nagovitsyn Yu.A. Nelineynaya matematicheskaya model solnechnoy tsiklichnosti i vozmozhnosti dlya rekonstruktsii aktivnosti v proshlom. [A non-linear mathematical model of solar cyclicity and the possibility of reconstructing activity in the past] // *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal* 1997. T. 23. № 11–12. P. 859–862. (In Russian)

Pokrovsky O.M. Analiz faktorov izmeneniya klimata po dannym distantsionnykh i kontaknykh izmereniy, [Analysis of climate change factors according to distance and contact measurements] // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010. № 5. P. 11–24. (In Russian)

Pokrovsky O.M. Izmeneniya oblachnosti v period globalnogo potepleniya po rezultatam mezhdunarodnogo sputnikovogo proekta. [Cloud change during global warming following

an international satellite project.] // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009. № 1. P. 3–13.

Khromov S.P. O nekotorykh spornykh voprosakh, otnosyashchimsya k tsiklichnosti solnechnoy aktivnosti i ee predpolagaemyim svyazyam s klimatom [On some controversial issues related to the cyclical nature of solar activity and its alleged relationship with the climate.] // *Meteorologiya i gidrologiya*, 1973. № 9. P. 93. (In Russian)

Argo Steering Team. On the design and Implementation of Argo – an initial plan for the global array of profiling floats // *International CLIVAR Project Office Report*, 1998, 21. P. 32.

Broecker W.S., Peteet D.M., Rind D. Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? // *Nature*, 1985. V. 315. P. 21–26.

Churchыы J.A., White N.J. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century // *Survey Geophysics*, 2011. V. 32, 585–602.

- Daubechies I.* The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis. // *IEEE Trans. Inform. Theory.* 1990. V. 36. P. 961–1004.
- Dima M., G. Lohmann, Dima I.* Solar-induced and internal climate variability decadal time scales // *Int. J. Climatol.* 2005. V. 25. P. 713–733.
- Etheridge D.M., Steele L.P., Langenfelds R.L., Francey R.J., Barnola J.-M., Morgan V.I.* Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn // *J. Geophys. Res.*, 1996. V. 101 (D2). P. 4115–4128.
<https://doi.org/10.1029/95JD03410>
- Jenkins G.M., Watts D.G.* Spectral Analysis and Its Applications // Holden-Day, 1968, 525 p.
- Jones P.D., Lister D.H., Osborn T.J., Harpham C., Salmon M., Morice C.P.* Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010 // *J. Geophysical Research.* 2012. V. 117. D05127.
<https://doi.org/10.1029/2011JD017139>
- Glaisberg W.* Revision of the probability laws of sunspot variations // Frankfurt (M.): Astronom. Inst., 1973, 246 p.
- Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S.* Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004. V. 11 P. 561–566.
- Keeling C.D., Bacastow R.B., Bainbridge A.E., Ekdahl C.A., Guenther P.R., Waterman L.S.* Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii // *Tellus.* V. 28. P. 538–551.
- Kondratyev K.Ya.* Actinometry // *L. Gidrometeoizdat*, 1965, 327 p.
- Kondratyev K.Ya.* Radiation factors of modern changes in the global climate // *L.: Gidrometeoizdat*, 1980. 279 p.
- Kondratyev K.Ya., Binenko V.I.* Influence of cloudiness on radiation and climate // *L.: Gidrometeoizdat*, 1984. 240 p.
- Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F.* Modeling of the global carbon cycle // *M., FizMatLit*, 2004, 336 p.
- Kondratyev K.Ya.* Climatic Effects of Aerosols and Clouds // Springer Praxis Books, 1999, 264 p.
- Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P., Baranova O.K., Garcia H.E., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Reagan J.R., Seidov D., Yarosh E.S., Zweng M.M.* World Ocean heat content and thermocline sea level change (0–2000 m) 1955–2010 // *Geophys. Res. Lett.*, 2012. V. 39. L10603.
<https://doi.org/10.1029/2012GL051106>
- Liebmann B., Smith C.A.* 1996: Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset // *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996. V. 77. P. 1275–1277.
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A., Jones P.D.* Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 dataset // *J. Geophysical Research*, 2012. V. 117. D08101.
<https://doi.org/10.1029/2011JD017187>
- NH ice extent and area from <http://nsidc.org/data/g02135.html> [million km²] area covered with at least 15% ice.
- Pokrovsky O.M.* A coherency between the North Atlantic temperature nonlinear trend, the eastern Arctic ice extent drift and change in the atmospheric circulation regimes over the northern Eurasia. *In a book “Influence of Climate Change and Sub-Arctic Conditions on the Changing Arctic”* (Ed. J.C.J. Nihoul, A.G. Kostianoy) // Springer Science Publ., 2009. P. 25–36.
- Polyakov I., Johnson M.A.* Arctic decadal and interdecadal variability // *Geophys. Res. Lett.*, 2000. V. 27. P. 4097–4100.
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U.S., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Walsh D., Yulin A.V.* Long-Term Ice Variability in Arctic Marginal Seas. *J. Climate* // 2003. 16. P. 2078–2075.
- Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B., Folland C.K., Alexander L.V., Rowell D.P., Kent E.C., Kaplan A.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № D14, 4407.
<https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
- Robinson D.A., Estilow T.W., NOAA CDR Program* (2012): NOAA Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE), Version 1. Northern Hemisphere // NOAA National Centers for Environmental Information.
<https://doi.org/10.7289/V5N014G9>
- Sorensen B.* Renewable Energy., N.Y. Academic Press, 1979, 682 p.
- Trenberth K.E., Paolino D.A.* The Northern Hemisphere Sea-Level Pressure Data Set: Trends, Errors and Discontinuities // *Mon. Wea. Rev.*, 1980. V. 108. P. 855–872.
- Torrence C., Compo G.* A practical guide to wavelet analysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998. V. 79. P. 61–78.