

М.В. Кабанов

Региональные аспекты современной климатологии по результатам анализа наблюдаемых природно-климатических изменений в Сибири

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 1.08.2006 г.

По результатам статистического анализа наземных и аэрокосмических инструментальных данных для Сибири обсуждаются региональные и субрегиональные (мезомасштабные) особенности наблюдаемых природно-климатических изменений и их динамические особенности (временные масштабы изменений). Анализируется роль различных глобальных факторов (космофизических, геофизических, биосферных и антропогенных) в наблюдаемых региональных особенностях, в том числе ретроспектива последних на геологической шкале времени. Выделен климатический феномен XX в. по корреляционным связям вейвлет-спектров для среднегодовой приземной температуры в Западной Сибири и индекса Северо-Атлантического колебания с оценкой их фазового сдвига (до 7 лет). Формулируются первоочередные задачи по развитию интегрированных региональных исследований в Сибири.

Введение

При исследованиях глобальных и региональных природно-климатических изменений встает беспрецедентно сложная проблема, состоящая в том, что взаимосвязанные наблюдаемые изменения окружающей среды и климата не поддаются объяснению в рамках простой парадигмы «причина—следствие» (Амстердамская декларация, 2001). Более того, при описании этих изменений необходимо учитывать, что многие климатообразующие факторы космофизического (в том числе гелиосферного), геосферного, биосферного и антропогенного происхождения определяют не только изменения состояний природно-климатической системы, но и специфическую для разных регионов эволюцию тех физических процессов и явлений, которые лежат в основе этих изменений.

Результаты интенсивных научных исследований в последние годы в рамках международных, национальных и региональных программ привели к выводу о том, что интегрированные (мультидисциплинарные) региональные исследования следует признать приоритетными [1]. При таких исследованиях становятся необходимыми как регионализация существующих математических моделей глобального климата, так и организация комплексных инструментальных наблюдений большего числа одновременно измеряемых параметров. Пока сопряжение двух научных подходов (математического моделирования и регионального мониторинга) при совместных исследованиях наталкивается на нерешенные проблемы, ряд из которых отмечен в [2].

Решение этих проблем, а также обсуждаемых ниже, представляется актуальной задачей для современной климатологии, в которой феноменологическое обсуждение эмпирических данных пока прева-

лирует над физико-математическим описанием наблюдаемых изменений.

Ниже обсуждаются те результаты анализа наземных и аэрокосмических инструментальных данных для Сибири, которые выявили региональные и субрегиональные (мезомасштабные) особенности наблюдаемых природно-климатических изменений, а также их динамические особенности (временные масштабы). К числу таких особенностей относятся: проявление субрегиональных температурных аномалий до высот, превышающих пограничный слой атмосферы; выявленный климатический феномен, состоящий в повышенной корреляции среднегодовой приземной температуры региона и планетарных индексов с многолетним фазовым сдвигом коррелируемых временных рядов наблюдений, и некоторые другие. Обсуждению выявленных региональных особенностей и их значения для теории климата предшествует краткая историческая справка об исследуемом регионе.

Ретроспектива региональных особенностей Сибири

Современные научные знания об эволюции системы Земля дают основания для ретроспективного взгляда на региональные особенности климатических и экосистемных изменений в свете взаимодействия глобальных и региональных процессов на планете. Историческое прошлое Сибири на шкале геологического времени удастся выделить, и оно оказывается особенно впечатляющим.

На рис. 1 в логарифмическом масштабе по обеим осям координат представлена эволюция атмосферы и континентов в соответствии с материалами учебного пособия по исторической геологии [3].

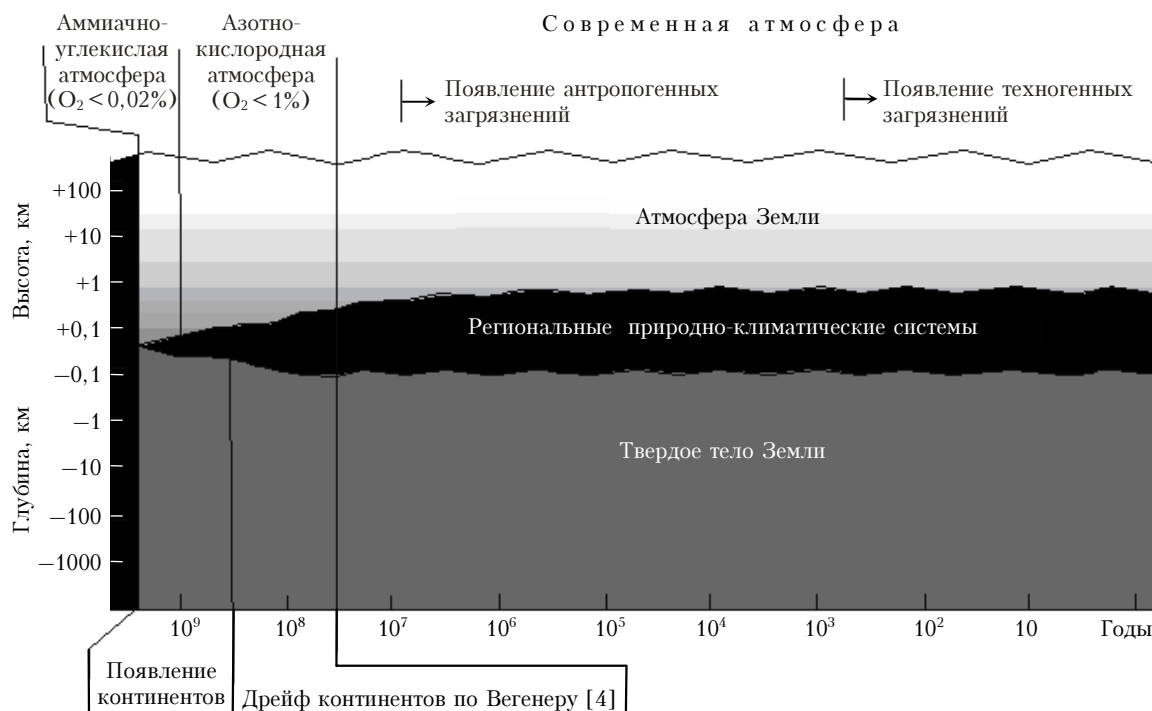


Рис. 1. Некоторые геологические этапы в эволюции атмосферы и твердого тела Земли

Начало координат по временной оси (абсцисс) соответствует возрасту Земли (около 5 млрд лет). Вертикальные тонкие линии приближенно отмечают шкалу некоторых эволюционных событий для атмосферы и твердого тела Земли. Горизонтальные волнистые линии условно выделяют региональные природно-климатические системы над сушей Земли (верхняя линия – по высоте пограничного слоя атмосферы, нижняя линия – по глубине деятельного слоя литосферы). Начало обеих линий обычно относят к 2,5 млрд лет назад, когда на Земле впервые появились участки суши.

Эволюция атмосферы Земли характеризуется первым выделяемым нами важным событием, связанным с появлением суши. До того аммиачно-углекислая атмосфера (содержание кислорода менее 0,02%), в которой успели зародиться бескислородные живые организмы, начинает постепенно обогащаться кислородом и превращаться в азотно-кислородную атмосферу (содержание кислорода до 1%), в которой живая природа перестраивается на новую линию развития (кислородосодержащую).

Этот геологический этап, включающий палеозойскую и мезозойскую эры (от 500 до 65 млн лет назад), характеризуется эволюцией состава атмосферы до близкого к современному.

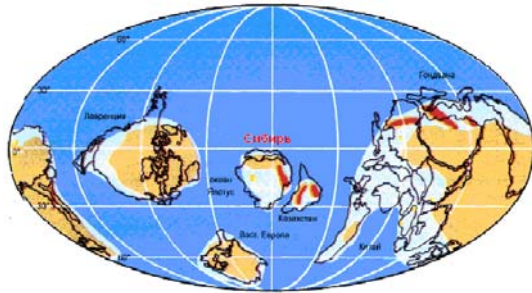
Другое выделяемое нами важное событие для атмосферы связано с появлением человека (около 10 млн лет назад) и с постепенно возрастающим антропогенным воздействием на атмосферу. Особенно ошутимое антропогенное воздействие на окружающую среду и климат следует отнести к последним векам, когда заметно возросли техногенные нагрузки на атмосферу и стала неоспоримой их роль в современных

наблюдаемых изменениях, по крайней мере для отдельных регионов планеты.

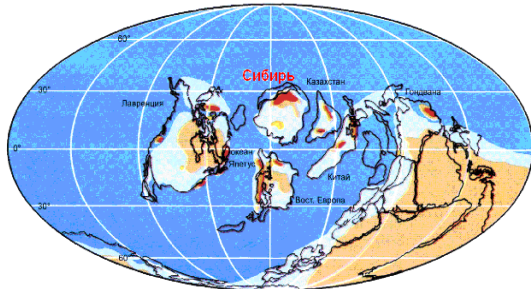
Эволюция твердого тела Земли в геологическом прошлом приводила к кардинальным изменениям региональных природно-климатических систем. Геологический этап, когда происходил дрейф континентов [4], может считаться начальным для появления Сибирского региона планеты. На рис. 2 представлены отдельные фрагменты из карт исторической геологии по [5], на которых обозначен континент, выделяемый как Сибирь.

Из рис. 2 видно, что из первоначального географического положения в Южном полушарии Сибирь в последующем дрейфовала в Северное полушарие со смещением на восток. Естественно, что при таком дрейфе на протяжении нескольких климатических эпох в Сибири, как и в других регионах, происходили кардинальные природно-климатические изменения.

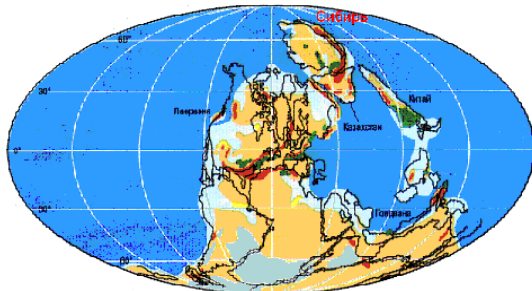
Современные высокоточные инструментальные наблюдения фиксируют продолжающиеся заметные (за пределами ошибок наблюдения) изменения положения континентов и рельефа земной поверхности [6]. Эти и другие геосферные процессы (извержения вулканов, землетрясения, тепловые потоки в литосфере и др.) относятся к числу природных факторов, которые продолжают оказывать существенное влияние на современные климатические и экосистемные изменения. Поэтому исследование этого климатически значимого фактора остаются актуальным разделом для современной климатологии, в том числе и для интегрированных региональных исследований.



523–505 млн лет назад (Кембрий)



448–438 млн лет назад (Ордовик)



300–286 млн лет назад (Карбон)



144–65 млн лет назад (Мел)

Рис. 2. Положение континентов для некоторых периодов на шкале геологического времени (из [3] по [5])

Пространственные масштабы наблюдаемых региональных особенностей

Современные математические модели климата Земли (наиболее передовой признается модель ИВМ [7]) учитывают как глобальные процессы атмосферной и океанической циркуляции, так и известные физические процессы на всех высотных уровнях в атмосфере и деятельном слое литосферы. Такой глобальный подход, основанный на физической теории климата [8], не имеет граничных условий по пространственным координатам.

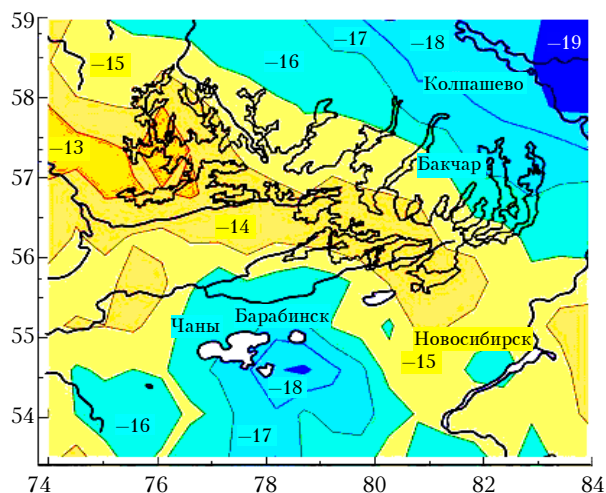
Верификация расчетных траекторий по таким моделям оказывается затруднительной, так как мировая сеть наблюдений размещена неравномерно по земной поверхности (преимущественно на поверхности суши) и инструментально наблюдается на этой сети ограниченное число параметров. Тем не менее, как отмечалось в [8], «по-видимому, нет других путей к пониманию чувствительности климата, кроме его моделирования. Это рискованное предприятие с неопределенными и, возможно, весьма скромными шансами на успех, но игра стоит свеч, поскольку и надежды на полезную отдачу также весьма велики».

С другой стороны, накопленные ряды инструментальных наблюдений во многих регионах планеты уже многократно превышают необходимый временной интервал (30 лет), в пределах которого считается, что осредненные метеорологические величины характеризуют климатическую систему. Статистическая обработка таких рядов наблюдений позволяет не только верифицировать существующие математические модели для значительных временных периодов, но и выявлять возможные эмпирические закономерности. Однако для выявления таких закономерностей необходимы предварительные исследования масштабов тех территорий (пространственные масштабы) и тех временных периодов (временных масштабов), в пределах которых те или иные динамические характеристики региональной климатической системы являются однородными по определяющим факторам воздействия.

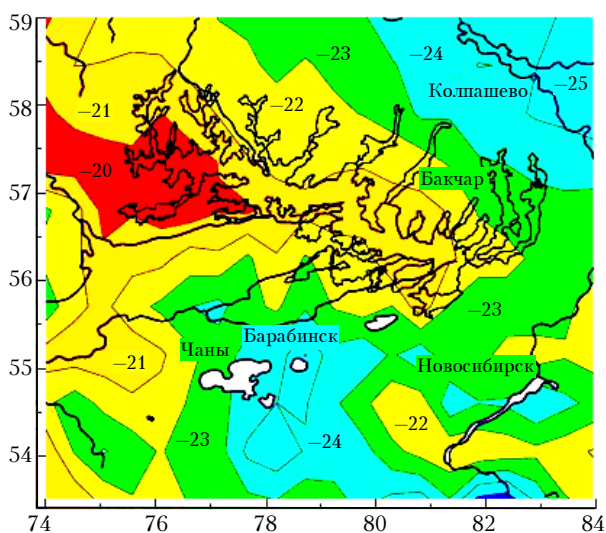
Горизонтальные масштабы региональных особенностей при наблюдаемых природно-климатических изменениях в Сибири могут быть оценены по карте линейных трендов потепления, которая была нами построена для периода 1955–1998 гг. [2, 9]. Из этой карты следует, что при характерных трендах $0,3–0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет для большей части территории Сибири проявляются также «очаги» ускоренного потепления $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет с субрегиональными масштабами (100–200 км). Такая мезомасштабная неоднородность наблюдаемого потепления совпадает по масштабам неоднородностей для ряда других метеорологических параметров (например, для грозовой активности [10]) и, следовательно, должна учитываться при мониторинге и моделировании региональных климатических систем.

Влияние экологических систем на горизонтальные масштабы неоднородностей в наблюдаемых изменениях следует из результатов обработки спутниковых данных для территории Большого Васюганского болота с помощью спектрорадиометра MODIS [11]. На рис. 3, а приведена карта распределения среднемесячной приземной температуры (на высоте 1000 мбар) по данным для февраля 2004 г. По осям координат показаны в градусах широта (вертикальная ось) и долгота (горизонтальная ось) территорий.

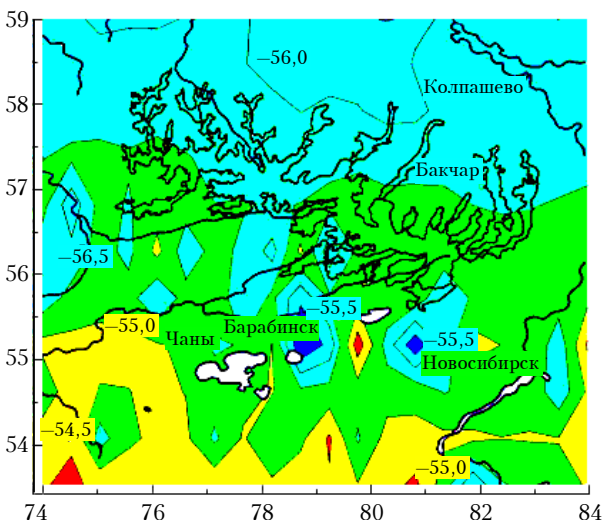
Контурные очертания Большого Васюганского болота, в целом имеющего площадь 53 тыс. км^2 , приведены в центре рисунка. Как видно из рис. 3, а, контуры территории с повышенной приземной температурой в феврале близки к контурам этой болотной экосистемы. Такой «отепляющий» эффект



а



б



в

Рис. 3. Распределение поля температур на разных высотах над территорией Большого Васюганского болота по спутниковым данным (спектрорадиометр MODIS, февраль 2004 г.): а – 1000 мбар (~0 км); б – 700 мбар (~3 км); в – 300 мбар (~9 км)

связывается нами с особыми теплофизическими свойствами торфяного болота. Аналогичные карты для летних месяцев отчетливо выявляют и «охлаждающий» эффект этого болота с мезомасштабными размерами.

Вертикальные масштабы, в пределах которых проявляются субрегиональные особенности экологических систем, следуют из рис. 3, б и в. Распределение поля температур на разных высотах, как видно из рис. 3, оказывается неоднородным над Большим Васюганским болотом и прилегающими территориями вплоть до тропопаузы (300 мбар). Таким образом, вертикальные масштабы субрегиональных особенностей существенно превышают высоту пограничного слоя атмосферы (около 1000 м), в пределах которого состояние атмосферы принято считать зависящим от свойств земной поверхности.

Приведенные выше оценки пространственных масштабов для региональных и субрегиональных особенностей в Сибири представляются достаточно надежными и согласуются с феноменологическими наблюдениями. Несмотря на то что количественные оценки по абсолютным значениям наблюдаемых параметров отягощены возможными ошибками инструментального и методического характера, полученные результаты по относительным значениям этих параметров (по пространственному распределению) не вызывают сомнений и могут быть использованы при обосновании территориальных масштабов комплексного климато-экологического мониторинга и при моделировании региональных климатических систем.

Временные масштабы наблюдаемых изменений

Исследования динамических характеристик региональных природно-климатических систем необходимы не только для выявления закономерностей наблюдаемых природных и климатических изменений, но и для решения методологических проблем интегрированных региональных исследований. Еще в 1986 г. академик М.И. Будыко отмечал, что «... при отсутствии общепринятого определения масштаба времени, разделяющего процессы, формирующие погоду, и процессы, формирующие климат, отличить погодные катастрофы от климатических катастроф не всегда удается» [12]. Но вопрос об обусловленных погодными или климатическими процессами экстремальных метеорологических явлениях (в том числе о катастрофах) является одним из многих, если ставится задача о выделенном описании климатических изменений (процессов). При этом встают вопросы и о пространственно-временных масштабах наблюдаемых климатических изменений, и об определяющих факторах, вызывающих эти изменения, и о тех динамических характеристиках, с помощью которых можно адекватно описать эти изменения.

Ниже приведены результаты корреляционного анализа накопленных временных рядов для некоторых инструментально наблюдаемых параметров,

широко используемых в качестве динамических характеристик климата. Анализ временных рядов выполнен с применением их вейвлет-преобразования [13, 14], на наш взгляд, в большей мере адекватного для спектрально-полосового характера климатических изменений по сравнению с Фурье-преобразованием таких рядов [15].

На рис. 4 по [16] приведены результаты корреляции вейвлет-спектров временных рядов между среднегодовой приземной температурой на территории Западной Сибири и некоторыми планетарными индексами. По осям отложено положение вейвлета на шкале текущих лет (горизонтальная ось) и масштабы периодичностей в вейвлет-спектре (вертикальная ось).

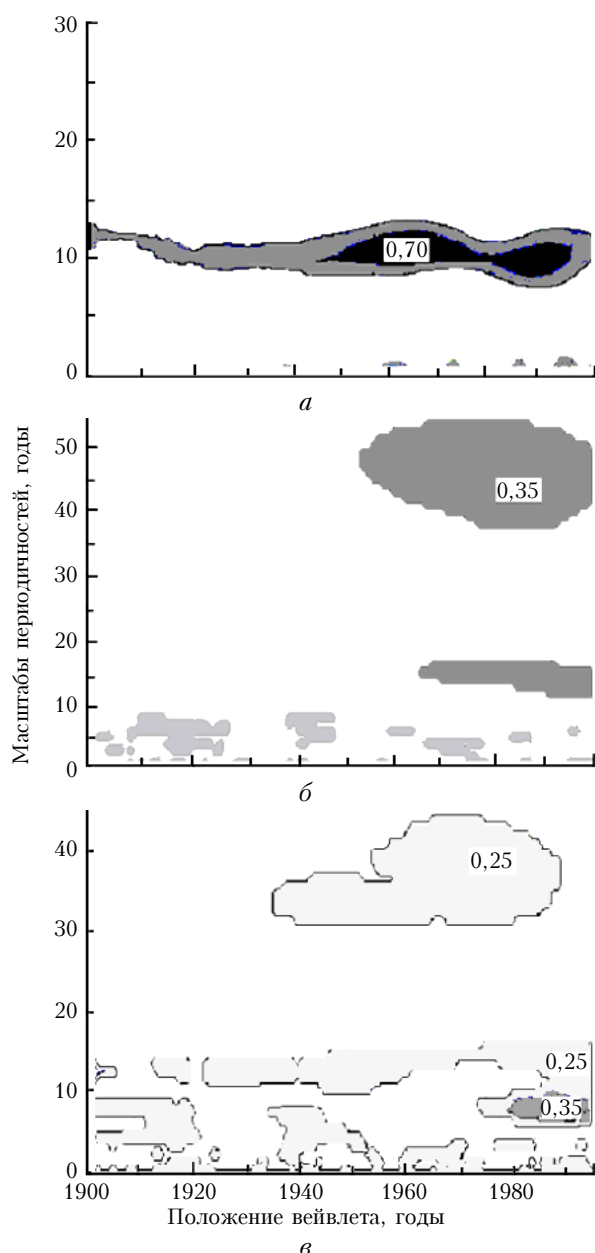


Рис. 4. Вейвлет-корреляция среднегодовой приземной температуры для Западной Сибири с числами Вольфа (*а*), индексом Южного колебания (*б*) и индексом Северо-Атлантического колебания (*в*)

Разная степень зачернения на рис. 4 соответствует разным величинам коэффициента корреляции (указаны цифрами).

Из рис. 4, *а* видно, что для масштабов периодичностей в 9–14 лет, которые выявляются вейвлет-преобразованием временных рядов, во второй половине XX в. появилась устойчивая корреляция между среднегодовой приземной температурой и числами Вольфа. Такой результат при достаточно высокой величине коэффициента корреляции (0,7) свидетельствует о значительной роли солнечной активности в эти годы для выявленного масштаба периодичностей, которые отражают ритмичность климатических, а не погодных процессов. Следует отметить, что для других масштабов периодичности корреляционные связи вейвлет-спектров по этим параметрам оказались статистически незначительными.

На рис. 4, *б*, *в* представлены корреляционные связи вейвлет-спектров для среднегодовой приземной температуры и таких планетарных индексов, как индекс Южного колебания и индекс Северо-Атлантического колебания. В обоих случаях для маломасштабных периодичностей (< 15 лет) корреляция этих параметров оказывается неустойчивой. В то же время проявляется статистически значимая корреляция (с коэффициентом корреляции до 0,35) для масштаба периодичности более 30 лет. Этот результат, не проявляющийся при корреляции непосредственно временных рядов и впервые выявленный нами при корреляции вейвлет-спектров, может рассматриваться как климатический феномен 40–80-х гг. XX в. Его начальное время почти совпадает с отмеченным в [17] 1950 г., «который был переломным в эволюции общей циркуляции атмосферы в XX веке». Конечное время этого феномена совпадает с отмеченным в [18] 1980 г., после которого ранее синхронные на протяжении столетия кривые для средней мощности солнечного цикла и для усредненной за период солнечного цикла приземной температуры в Иркутске стали расходиться в противоположные стороны [18, рис. 11].

Для выяснения природы обнаруженного климатического феномена нами были определены фазовые сдвиги вейвлет-спектров для временных рядов среднегодовой приземной температуры и индекса Северо-Атлантического колебания [16]. Такой выбор коррелируемых параметров связан с известным преимущественным влиянием западного переноса на климат Западной Сибири. Результаты выполненных расчетов приведены на рис. 5, где разная степень зачернения соответствует разным величинам фазового сдвига в годах.

Как видно из рис. 5, фазовые сдвиги для периодичностей с малым масштабом (5–7 лет) в пределах ошибок вычислений отсутствуют, для периодичностей со средним масштабом (10–15 лет) составляют 1–3 года и только для периодичности большого масштаба (30–40 лет) увеличиваются до 7 лет. Эти многолетние фазовые сдвиги для периодичностей со средним и большим масштабом указывают на существенную связь наблюдаемого потепления в регионе не только с малоинерционными механизмами за счет

атмосферной циркуляции, но и с более инерционными механизмами океанической циркуляции.

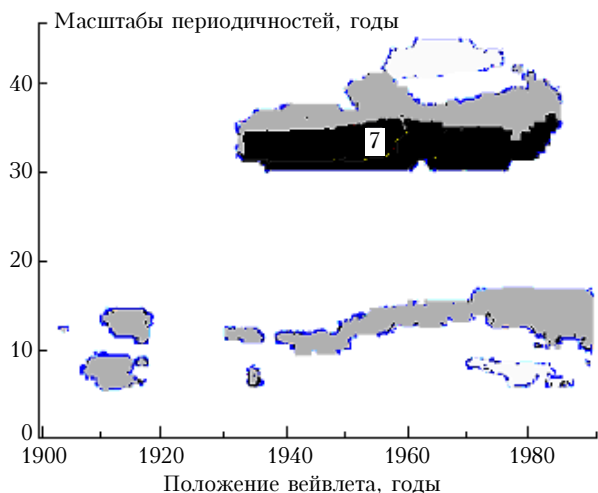


Рис. 5. Фазовые сдвиги между вейвлет-спектрами для среднегодовой приземной температуры Западной Сибири и индекса Северо-Атлантического колебания

Заключение

Рассмотренные выше пространственные и временные масштабы наблюдаемых природно-климатических изменений в Сибири относятся к числу существенных, но не исчерпывающих совокупность случайных и детерминированных характеристик для региональной природно-климатической системы. При анализе преимущественно межгодовых изменений за рамками обсуждения остались, например, систематические внутригодовые колебания, амплитуда которых в Сибири многократно превышает наблюдаемые межгодовые изменения. Эти колебания обусловлены погодными процессами, но трендовые изменения их амплитуд и фаз являются климатически значимыми и обусловлены климатическими процессами. Не рассмотрены остались и многие другие характеристики региональных природно-климатических систем. Тем не менее обсужденные выше результаты уже позволяют выделить приоритетные задачи интегрированных региональных исследований.

К числу таких первоочередных задач мы относим:

– обоснованный выбор территориальных масштабов для комплексного климатоэкологического мониторинга, который в настоящее время в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН проводится на четырех стационарах, разнесенных на 200 км и расположенных в характерных для Западной Сибири географических районах;

– обоснование динамических параметров при согласованном описании по математическим моделям и эмпирическим данным тех климатических и экологических процессов, которые в настоящее время описываются либо функционалами погодных процессов с последующим их осреднением на климатический период (для климатических систем), либо феноменологическими характеристиками (для экологических систем);

– развитие научно-методических основ анализа накопленных инструментальных данных и выявление закономерностей современных природно-климатических изменений для создания необходимой эмпирической базы по моделированию, прогнозированию и возможному регулированию происходящих региональных изменений с учетом возрастающей роли антропогенных воздействий.

Настоящая статья подготовлена по материалам доклада на совместном пленарном заседании Международной конференции по наблюдениям, моделированию и информационным системам для окружающей среды (ENVIROMIS-2006) и 6-го Симпозиума «Контроль и реабилитация окружающей среды» (Томск, июль 2006 г.).

Автор благодарен профессору И.И. Ипполитову и С.В. Логинову за обсуждение и участие в подготовке публикуемых материалов.

1. *International Geosphere – Biosphere Programm II. Special Edition Issue, IGBP Newsletter. N 50, June 2002. 52 p.*
2. *Кабанов М.В., Лыкосов В.Н.* Мониторинг и моделирование природно-климатических изменений в Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19. № 9. С. 1–14.
3. *Подобина В.М., Родыгин С.А.* Историческая геология: Уч. пособие. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. 262 с.
4. *Ушаков С.А., Ясаманов Н.А.* Дрейф материков и климаты Земли. М.: Мысль, 1984. 206 с.
5. *Monroe J.S., Wicander R.* The Changing Earth Exploding // *Geology and Evolution.* West Publ. Co. 1994. 731 p.
6. *Трубицын В.П.* Тектоника плавающих континентов // *Вестн. РАН.* 2005. Т. 75. № 1. С. 10–21.
7. *Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазунов А.В., Грицун А.С., Дианский Н.А., Толстых М.А., Чавро А.И.* Моделирование климата и его изменений // *Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования.* М.: Наука, 2005. Т. 2. С. 37–173.
8. *Физические основы теории климата и его моделирования:* Пер. с англ. / Под ред. А.С. Монина. Л.: Гидрометеопиздат, 1977. 271 с.
9. *Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Комаров А.И., Кусков А.И.* Современные природно-климатические изменения в Сибири: ход среднегодовых приземных температур и давления // *Геогр. и природ. ресурсы.* 2004. № 3. С. 90–96.
10. *Алехина Н.М., Горбатенко В.П.* Изменения грозовой активности над Западной Сибирью (Глава 3) // *Региональный мониторинг атмосферы. Часть 4. Природно-климатические изменения.* Томск: МГП «Раско», 2000. 270 с.
11. *Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Лагутин А.А., Логинов С.В.* Мезомасштабное влияние Большого Васюганского болота на температурный режим территории // *Матер. 6-го Сибирского совещания по климатоэкологическому мониторингу* / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Препринт ИМКЭС СО РАН, 2005. С. 49–54.
12. *Будыко М.И.* Климат и биосфера // *Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии.* СПб.: Наука, 2005. С. 9–24.
13. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физ. наук.* 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.

14. Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебания климата по данным наблюдений. М.: Наука, 2005. 191 с.
15. Иванов В.В. Периодические колебания погоды и климата // Успехи физ. наук. 2002. Т. 172. № 7. С. 777–811.
16. Итолитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Пространственные и временные масштабы наблюдаемого потепления в Сибири // Докл. РАН (в печати).
17. Вакуленко Н.В., Монин А.С., Шишков Ю.А. Об изменениях общей циркуляции атмосферы в XX веке // Докл. РАН. 2000. Т. 371. № 6. С. 802–805.
18. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 12. С. 1003–1017.

M.V. Kabanov. Regional aspects of the present-day climate from analysis of observed natural-climatic variations in Siberia.

Regional and subregional (mesoscale) peculiarities of observable natural-climatic variations and their dynamical features (time scales of variations) are discussed based on results of statistical analysis of ground-based and space-borne instrumental data. Role of different global factors (space-physical, geophysical, biosphere, and anthropogenic) in the observed regional peculiarities, as well as their retrospection on the geologic time scale are analyzed. The climatic phenomenon of the XX century was distinguished from correlation connections of veivlet-spectra for yearly-mean ground temperature in the West Siberia and North-Atlantic oscillation index with estimate of their phase shift (up to 7 years). In conclusion, urgent tasks on development of integrated regional investigations in Siberia are formulated.