

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ СОСТОЯНИЕМ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СУБАРКТИКИ И КЛИМАТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

© 2012 г. Н. Г. Платонов*, И. Н. Мордвинцев, И. В. Алпацкий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем экологии
и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук, Москва

*E-mail: platonov@sevin.ru

Поступила в редакцию 23.01.2012 г.

Рассмотрены широкомасштабные связи между растительной фенологией и физической средой в умеренных широтах Северного полушария в течение периода 1982–2007 гг. с использованием линейных методов пространственной корреляции, анализа главных компонент и анализа канонических корреляций, примененных к данным нормализованного дифференциального вегетационного индекса, полученных по измерениям AVHRR, концентрации морского льда (многоканальный радиометр SMMR, SSM/I) и температуры воздуха (атлас повторного анализа NCEP/NCAR). Показано, что обратная связь между июньской растительностью тундровых зон и сохранением льда в прибрежных акваториях Северного Ледовитого океана в летний период определяется широкомасштабными атмосферными процессами. Построенная модель с одним предиктором позволила реконструировать пространственное распределение вегетационного индекса на период, предшествующий спутниковым измерениям. В целом региональная изменчивость летней растительности может быть объяснена особенностями весенней атмосферной циркуляции.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, фенология растительности, нормализованный дифференциальный вегетационный индекс, концентрация морского льда, температура воздуха, тундровая зона, береговая зона арктических морей.

ВВЕДЕНИЕ

Нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), оцененный по данным спутникового дистанционного зондирования (ДЗ), является общепринятой метрикой, используемой для мониторинга хронологии вегетационного периода – сезона роста. Ранние даты начала прорастания растений весной затрагивают доступность и количество пищевых ресурсов в местообитаниях животного мира. В то же время от этого зависит состояние организма и способность животных к воспроизводству (Griffith et al., 2002). В северных широтах насыщенные влагой почвы промерзают зимой, поэтому вегетационный рост весной и в начале лета зависит преимущественно от температуры поверхностного слоя воздуха (Cao et al., 2004; Raynolds et al., 2008).

В данной работе мы исследуем в широком масштабе пространственную связь между майской температурой поверхности в северных широтах и вегетационной фенологией в июне за 26-летний период (1982–2007 гг.). Арктическая климатическая система образуется процессами, происходящими как в океане, включая морской лед, так и над сушей. Поэтому связь между разнесенными

во времени ледовыми условиями и вегетационной фенологией также рассмотрена.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных для анализа использованы три базовых источника.

1. Полумесячные усредненные комбинированные значения NDVI в регулярной 8-км сетке, разработанные группой Картографические исследования, и глобальное инвентаризационное моделирование (Global Inventory Modeling and Mapping Studies, GIMMS) Национального управления США по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautic and Space Administration, NASA) (Tucker et al., 2005). Версии 'd', 'p16' и '3v1' используются для 1982–2000, 2001–2002 и 2003–2007 гг. соответственно.

2. Среднемесячные температуры воздуха по уровню 850 мб севернее 30°с.ш. из NCEP/NCAR Reanalysis Atlas (Атлас повторного анализа атмосферных параметров, являющегося объединенным продуктом Национального центра прогнозирования изменений окружающей среды США (National Center for Environmental Prediction, NSEP) и Национального центра атмосферных исследований США (National Center for Atmospheric

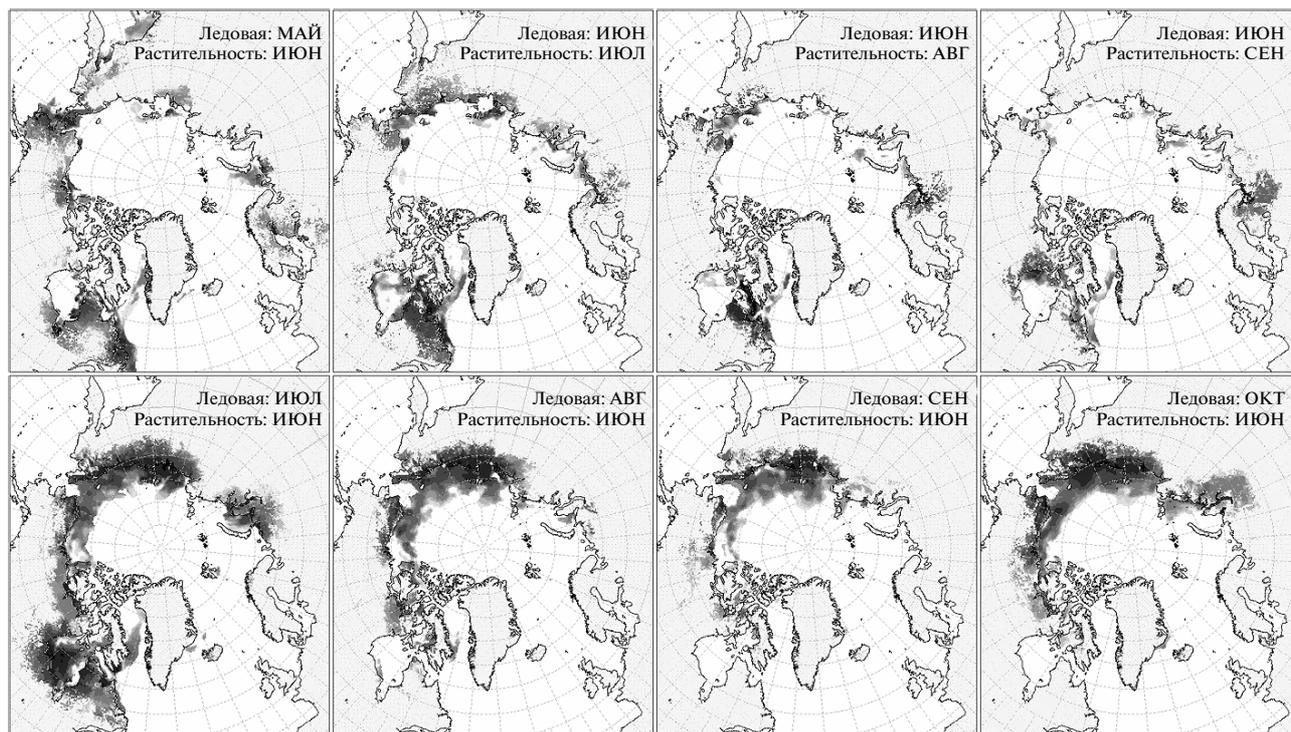


Рис. 1. Участки поверхности, участвующие в пространственной связи между концентрацией морского льда и NDVI.

Research, NCAR) Национального агентства США по изучению океана и атмосферы (National Ocean and Atmospheric Administration, NOAA)).

3. Среднемесячные концентрации морского льда для Северного полушария, разработанные Национальным информационным центром снега и льда США (National Snow and Ice Data Center, NSIDC).

Использованы следующие методы: анализ главных компонент (ГК); анализ канонических корреляций (АКК); анализ пространственных корреляций.

Для проведения анализа ГК и АКК исходная регулярная по широте и долготе сетка в 2.5° NCEP-данных преобразована в регулярную 175-км сетку в полярной равноплощадной проекции NSIDC EASE-Grid North (EPSG:3408) (Brodzik, Knowles, 2002). Выбор размера сетки (175 км) обусловлен стремлением уравновесить избыточность данных в северных широтах и разреженность данных в средних широтах, возникающих в результате перепроецирования. Восьмикилометровые данные NDVI в полярной стереографической проекции приводились к среднемесячным значениям в такой же полярной равноплощадной проекции EASE и с таким же размером сетки (175 км), что и атмосферные данные.

Для проведения анализа пространственных корреляций между NDVI и концентрацией морского льда выбрана полярная стереографическая

проекция NSIDC Sea Ice Polar Stereographic North (EPSG:3411) с размером сетки в 25 км. Данные NDVI преобразовались из полумесячных в среднемесячные (временное осреднение) и из 8-км сетки в 25-км сетку (пространственное осреднение). Данные концентрации льда преобразовывались из среднесуточных в среднемесячные. Пространственное преобразование для данных концентрации не проводилось по причине распространения данных в полярной стереографической проекции с размером сетки 25 км.

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

Для оценки характера связи между наземным NDVI и прибрежной концентрацией морского льда мы рассмотрели пространственные корреляции r со смещением во времени между этими двумя параметрами. На верхней панели рис. 1 изображены участки поверхности, участвующие в пространственной связи между среднемесячными значениями NDVI и концентрацией морского льда при условии, что оценка морского параметра (концентрация льда) по времени предшествует как минимум на один месяц оценке сухопутного параметра (NDVI). На нижней панели рис. 1 представлена обратная во временном масштабе связь: NDVI оценен как минимум на один месяц раньше концентрации морского льда.

Сама связь в количественной мере выражается коэффициентом корреляции и графически представляет собой отрезок, соединяющий две точки (два пиксела), одна из которых находится на суше, а другая соответствует участку морского льда. Сами отрезки не показаны на рис. 1, но для каждого пиксела интенсивность связи выражена в количестве отрезков, один из концов которых находится в данном пикселе, и представлена качественно в грациях серого: чем темнее область, тем сильнее связь.

Для того чтобы избежать проявления слабых связей и случайных зависимостей при отображении, использовались только те корреляции r (линии), которые удовлетворяли описанным далее по тексту условиям. И для концентрации льда, и для NDVI использовался период 1982–2007 гг. (26 наблюдений). Для каждого пиксела по маске океана отсеивались те ячейки раstra, для которых среднее квадратическое отклонение по концентрации морского льда не превышало 8%. Для суши происходило изъятие пиксела, если среднее квадратическое отклонение значения NDVI не превышало 0.035. Далее отбирались только те линии, для которых абсолютное значение корреляции превышало 0.50. Статистическая значимость $|r| = 0.50$ при $n = 26$ составляет более 99%. Во избежание пространственной случайности связи мы отсекали линии, длина которых составила более 2000 км. И, наконец, мы оставили лишь те линии, для которых выполнялось следующее условие: $r(50.0 - \sqrt{D}) > 15.0$.

Темные области над морской поверхностью в подавляющем большинстве связаны с ближайшими темными областями над поверхностью суши, т.е. проявляется региональная связь. Отрицательные значения коэффициента корреляции между среднемесячным ледовым покровом в мае и среднемесячным NDVI в июне (т.е. морской параметр опережает во времени сухопутный) наиболее распространены в регионах около низкоширотной внешней границы арктического пакового льда. Ледовитость в летний и осенний периоды гораздо сильнее коррелирует со значением NDVI, оцененного за предшествующий период (т.е. сухопутный параметр опережает во времени морской). Такая зависимость наиболее явно проявляется для восточной Евразии и северной Аляски.

АНАЛИЗ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

В последние десятилетия метеорологи затрачивают значительные усилия на извлечение важных закономерностей из измерений атмосферных параметров. Метод ГК используется как для выделения пространственных мод, несущих наибольшую информативность, так и для сокращения размерности данных.

Для проведения анализа ГК выбран метод сингулярного разложения, позволяющий получить связанные друг с другом в порядке убывания вариации временных рядов и пространственные структуры или моды (эмпирические ортогональные функции, ЭОФ). При разложении использовалась корреляционная матрица переменных и наблюдений. Первая ГК объясняет более трети общей вариации (34.5%). Вторая ГК объясняет 10.4% общей вариации, а первыми двумя компонентами объясняется 45% общей вариации. На третью ГК приходится 6.8% вариации, и суммарно первые три ГК объясняют более чем половину (52%) общей вариации. Четыре первых ГК объясняют 57% общей вариации, на четвертую компоненту приходится 4.9% вариации.

Вращение ЭОФ в данной работе рассматривалось, но не применялось.

На рис. 2 представлены первые четыре ЭОФ. Первая ЭОФ описывает единую пространственную структуру полушария. Последующие ЭОФ отражают региональные шаблоны неоднородности NDVI, пересекающие Европу, Скандинавию и Северную Америку.

На рис. 3 представлен результат линейного многомерного шкалирования для преобразования многомерного ($k = 1304$) множества данных в двухмерное ($k = 2$) с помощью метода принципиальных компонент.

В качестве альтернатив рассмотрены нелинейные шкалирования по методам isoMDS (Cox, Cox, 2001), для которого результат оказался близким к методу ГК, и Sammon (1969), по которому результат оказался более равномерно распределенным, но с сохранением групп, выделяемых по методу ГК. Явно выделяются 1983 и 2005 гг., соответствующие минимальному и максимальному значениям NDVI. По первой ГК явно выделяется группа из пяти непрерывных лет, с 2003 по 2007 гг., отделенная вручную вертикальной линией. При рассмотрении обоих ГК, к этой же группе можно отнести еще 2001 и 2002 гг. (наклонная пунктирная линия с единичным коэффициентом наклона на рис. 3), сохранив при этом непрерывность группы (2001–2007 гг.). Таким образом, можно предположить наличие узловой точки изменения вегетационного режима Северного полушария на рубеже веков.

АНАЛИЗ КАНОНИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯЦИЙ

В нашем исследовании мы применили анализ канонических корреляций (АКК) с использованием подхода, предложенного в работе (Barnett, Preisendorfer, 1987), в основе которого классический АКК проводится для главных компонент. Предсказанные значения будут в виде ГК, и по

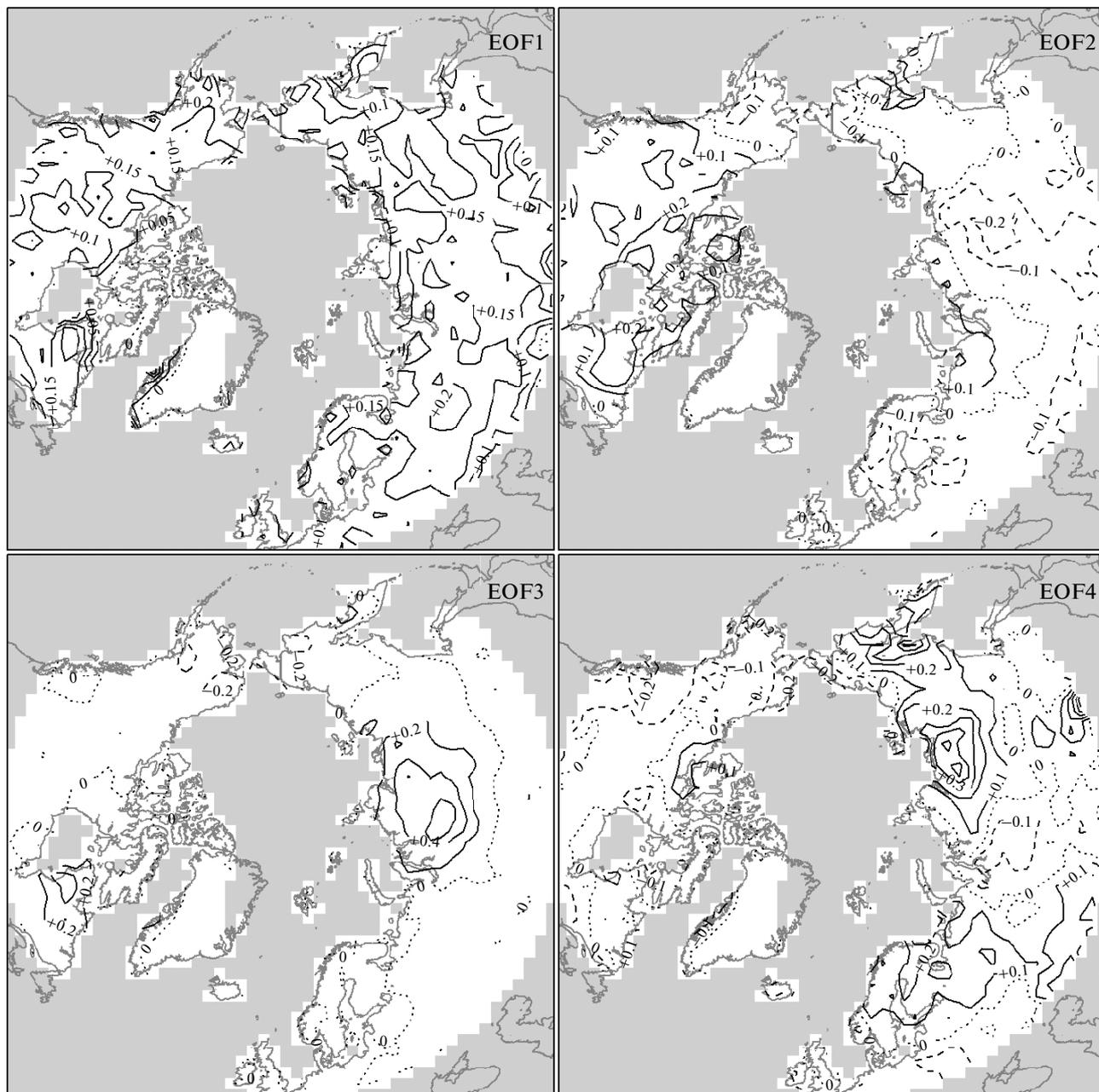


Рис. 2. Первые четыре ЭОФ (EOF1, EOF2, EOF3, EOF4 соответственно) NDVI.

этим ГК в дальнейшем производится восстановление первоначальной размерности.

Выбор предиктора и предсказываемого параметра происходил вручную. В качестве предсказываемого параметра рассматривались среднемесячные значения NDVI в начале лета (май, июнь), а также такой параметр, как изменение NDVI в текущем месяце по сравнению с предыдущим. Геопотенциальные высоты и температура воздуха по уровню 850 мб рассматривались как вероятные предикторы таким образом, чтобы их оценки были не позднее сроков вегетационных параметров.

Число ГК определялось вручную как для предиктора, так и для предсказываемого параметра. В результате была отобрана пара параметров – температуры воздуха в мае (16 ГК) и NDVI в июне (7 ГК).

Для NDVI значение индекса в каждой точке координатной сетки преобразовывалось в значение аномалии по сравнению с усредненным значением за период 1982–2007 гг. Анализ ГК проведен по матрице корреляций для обоих параметров пары. Для предиктора рассмотрены нормализация и анализ ГК для двух периодов: 1982–2007 гг. и 1948–2008 гг., итого получилось четыре вариан-

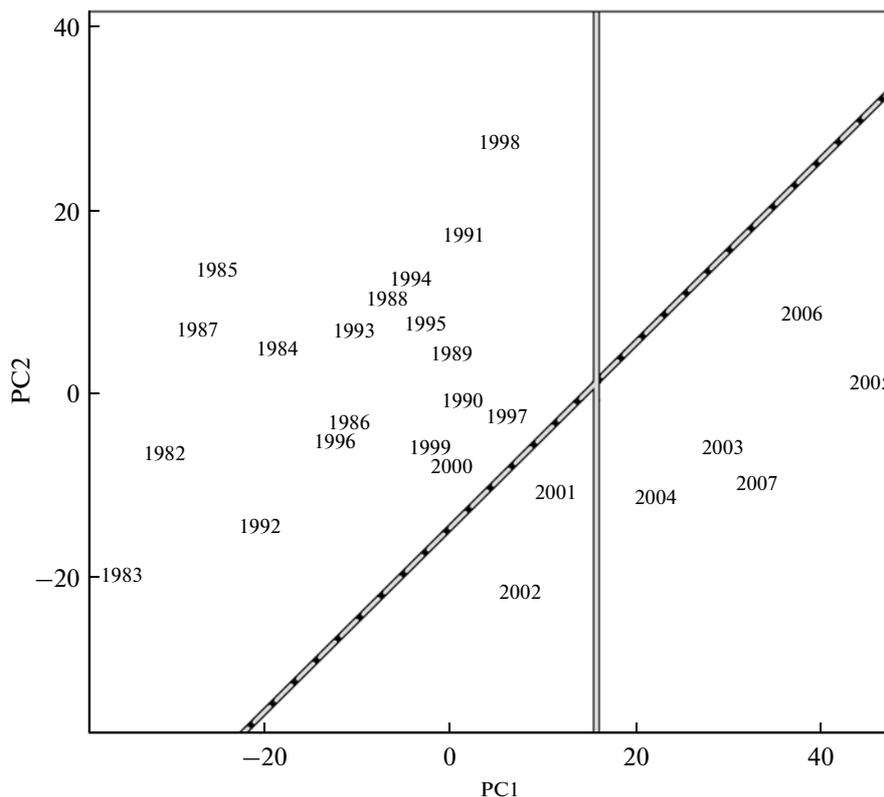


Рис. 3. Диаграмма рассеяния первых двух ГК (PC1 и PC2 соответственно) NDVI в июне.

та. В дальнейшем по тексту (если не оговорено дополнительно), нормализация данных осуществлена за период 1982–2007 гг., и анализ ГК предиктора также привязан к этому периоду.

На рис. 4 представлено пространственное распределение первых четырех в порядке убывания вариации канонических переменных (КП) по результатам АКК. Черный контур соответствует КП индекса NDVI в мае, белый – КП температуры воздуха по уровню 850 мб в июне. Географически прослеживаются совпадения областей с положительными значениями NDVI с положительной аномалией температуры. И, наоборот, над регионами с отрицательным значением КП NDVI, как правило, находятся области низких значений КП температуры воздуха.

Для проверки модели использовалась серия из трех тестов: самостоятельной проверки АКК, перекрестной проверки АКК и χ^2 Бартлетта.

При проведении самостоятельного теста осуществлено сравнение каждого из значений параметра с оценкой, предсказанной моделью; при этом модель оставалась неизменной. Перекрестная проверка проведена по методу однократного изъятия. Суть этого метода заключается в том, что для каждого значения параметра производилось изъятие этого наблюдения, затем модель перестраивалась заново, по модели строилось пред-

сказание для изъятых наблюдений, и проводился сравнительный анализ. Тест χ^2 Бартлетта используется для проверки однородности дисперсии.

Самостоятельная проверка семи КП продемонстрировала близость значений наблюдений и моделей, выражающаяся как в высоком значении коэффициента корреляции (r), так и в небольшом значении среднеквадратической ошибки (RMS). За исключением пятой КП ($r = 0.52$, $RMS = 0.84$), для остальных переменных $r \geq 0.88$ и $RMS \leq 0.46$. В отличие от самостоятельной проверки в перекрестном тесте появилось смещение (средняя разность между параметром и предсказанной оценкой). Для той же самой пятой КП оно составило 0.35, тогда как для первых четырех переменных по модулю оно не превысило 0.15. Для шестой и седьмой КП смещение почти одинаково и равно -0.27 . Для третьей КП значение коэффициента корреляции $r = 0.38$, статистическая значимость которого (S) при $n = 26$ составляет 94.1%. Для пятой КП корреляция отрицательная ($r = -0.52$), но для шестой КП $r = 0.49$ ($S = 99\%$).

Результаты многомерного регрессионного линейного анализа оказались близки к АКК. При проведении перекрестной проверки для пятой компонента коэффициент корреляции оказался значимым и отрицательным, для остальных шести статистическая значимость оказалась не ниже

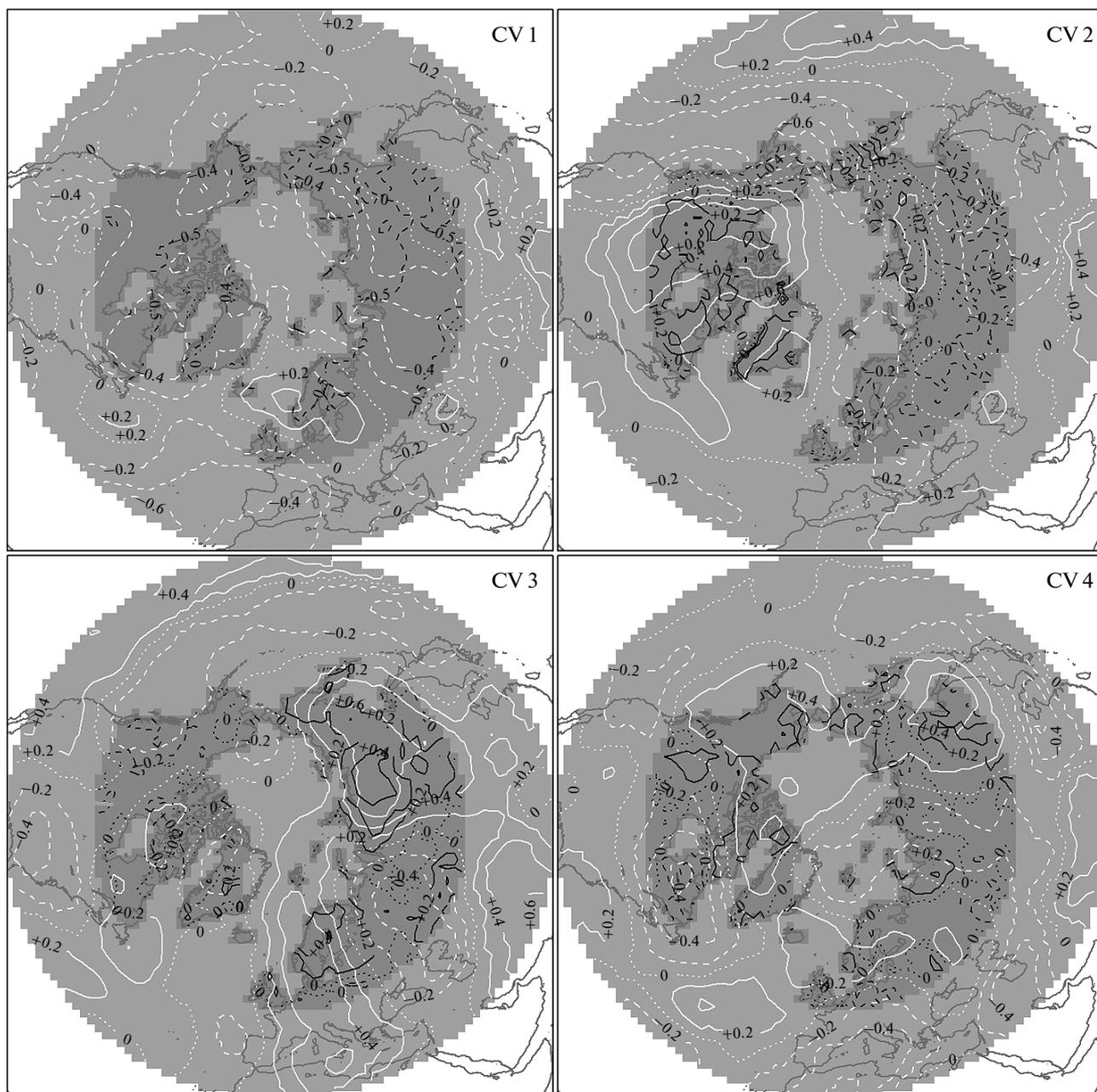


Рис. 4. Географические структуры четырех КП (CV1, CV2, CV3, CV4). Черный контур соответствует NDVI, белый – температуре воздуха.

97.5%. В этом случае пятая компонента может быть отброшена, а суммарная вариация будет складываться из вариаций 1–4 и 6–7 компонент.

По результатам теста χ^2 Бартлетта, первые четыре КП имеют $S > 96.5\%$, поэтому на основании этого теста и результатов перекрестной проверки принято решение оставить четыре КП. Общая доля дисперсии NDVI, объясненная температурой воздуха через четыре КП, составляет 54%. В случае использования семи КП объясняется 80% дисперсии.

Изменение во времени первых четырех главных компонент NDVI представлено на рис. 5. Пунктирной линией изображено LOESS-сглаживание (Cleveland et al., 1988). Первая ГК и соответствующая ей первая ЭОФ объясняют 35% вариации. Минимальное значение первой ГК приходится на 1983 г., а максимальное – на 2005 г. Такие же экстремумы отслеживаются и на исходных данных NDVI. Не считая значительного возрастания первой ГК в период наблюдения с малой межгодовой изменчивостью (высокое значение

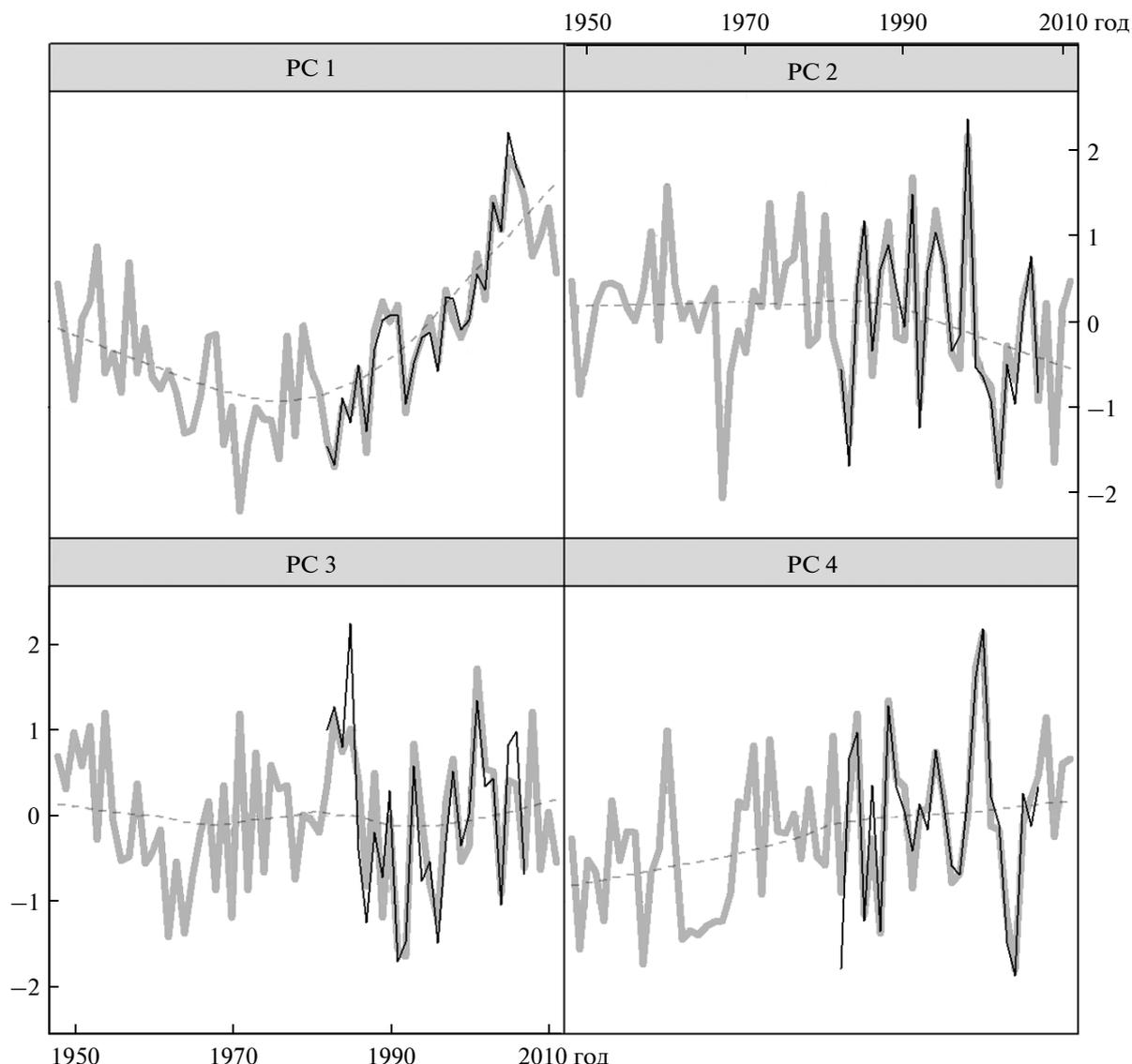


Рис. 5. Наблюдаемые (черная тонкая линия) и предсказанные (серая утолщенная линия) временные ряды первых четырех ГК NDVI (PC1, PC2, PC3, PC4).

автокорреляции), для трех последующих ГК отслеживаются более слабая составляющая линейного тренда и более значительная межгодовая вариабельность, что является следствием ежегодного проявления региональных особенностей.

В 1983 г. область положительной аномалии температуры воздуха возникла лишь над северо-западом России. Однако преобладающие южные ветра могли вынести это тепло в Арктику и далее в Северную Атлантику. Сильная отрицательная аномалия температуры воздуха преобладает над значительной территорией Канады, над Западно-Сибирской равниной и над Охотским морем. Центры областей преобладающего низкого давления близки к центрам негативных температурных аномалий и не позволяют теплomu воздуху из

южных широт распространиться на север. Наибольшая положительная аномалия NDVI наблюдалась к югу от устья Лены, при этом небольшая положительная аномалия температуры (+1°C) наблюдается в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском и тянется от устья Лены в меридианном направлении на юг. Одновременно отмечается большая ледовитость всех арктических морей, за исключением Баренцева моря.

В июне 2005 г. практически в любой точке суши севернее 50°с.ш. растительности было больше, чем в среднем за 26 лет с 1982 по 2007 г. Особенно сильные аномалии наблюдались над Среднесибирским плоскогорьем и Лабрадором. Центры положительных аномалий температуры воздуха также приходились на эти регионы, и

еще над Аляской воздух прогрелся на 4°C сильнее, чем обычно. Судя по скорости и направлению ветра, в центральной Арктике отмечается свойственная для этого сезона атмосферная циркуляция, но в целом атмосферное давление немного выше нормы. В районе периферийных арктических морей практически отсутствуют южные ветра, способные вытеснить теплый воздух с материковой части средних широт. Бофоров вихрь достаточно силен для возникновения циркуляции льда и препятствования выноса его в Атлантику через прол. Фрама. Наиболее сильное ослабление ледовитости обнаруживается в Чукотском, Восточно-Сибирском и Баренцевом морях, а также на востоке моря Бофорта и в западной части Карского моря.

Что касается второй ГК (10% вариабельности), то минимальное значение соответствует 2002 г., а максимальное – 1998 г. Возрастание второй ГК в 1998 г. может быть объяснено ярко выраженным температурным контрастом в Северном полушарии: над Северной Америкой и Северной Атлантикой преобладают поля повышенной температуры, а над центральной Арктикой и Чукоткой – отрицательные. И если в районе Северной Америки сохранилась положительная связь между температурой воздуха в мае и NDVI в июне, то над Юкагирским плоскогорьем индекс растительности оказался на 8% выше, чем обычно, несмотря на недостаточную прогретость воздуха в мае.

Май 2002 г. выдался для Северной Америки немного прохладнее, чем обычно. Это могло послужить причиной позднего начала вегетационного сезона на Лабрадоре, на востоке северо-западных территорий и на западе Канады. Достаточно интенсивно рост растительности наблюдался в Скандинавии и на Среднесибирском плоскогорье. Согласно исторической реконструкции по модели канонических корреляций, для Северной Америки 1967 г., возможно, был годом с низким индексом вегетации. Последнее следует из второй ЭОФ, которая наиболее сильно проявляет себя в этом регионе и по временному ряду предсказанного значения второй ГК.

Третья ЭОФ отвечает главным образом за рост растительности на Среднесибирском плоскогорье и Северо-Сибирской низменности. Вместе с диполем, образованным высоким NDVI на Лабрадоре и низким NDVI на Аляске и Чукотке, это объясняет 7% вариабельности NDVI в июне. Максимальное значение третьей ГК и с большим отрывом от других лет наблюдалось в 1985 г. И действительно этот год характеризовался низким NDVI почти во всем секторе Северного полушария от высоких широт до 50° с.ш. с ярко выраженной аномалией к югу от п-ова Таймыр. Что касается температуры воздуха, то к северу от Таймыра она была на один градус ниже среднего значения

за период 1982–2007 гг., но при этом в этом районе отмечена положительная аномалия давления. Пониженное давление над Среднесибирской возвышенностью вместе с повышенным давлением в этом регионе способствовали образованию барического диполя и возникновению ветров восточных румбов, закручиваемых в сторону материка лишь на Европейской части России. Отсутствие холодного воздуха из Арктики, возможно, способствовало росту растений к югу от Таймыра. На Аляске и Чукотке низкое значение индекса вегетации в 1985 г., возможно, связано с тяжелой ледовитой обстановкой в этом регионе. Низкое давление над о-вом Ньюфаундленд и высокое над Баффиновой Землей могли задержать вынос льда из Гудзонова пролива.

Во временном ряду четвертой ГК (5%) выделяются максимум в 2000 г. и два локальных минимума, близких по значению: в 2004 г. и 1982 г. Четвертая ЭОФ наиболее ярко проявляет себя в устье р. Лены и на Камчатке. В июне 2000 г. почти на всей территории северной части Евразии наблюдалось повышенное значение NDVI, за исключением Северо-Сибирской низменности. Значительная позитивная аномалия наблюдается на северо-западе Западно-Сибирской равнины. Отмечается раннее появление Большой Сибирской полыньи к западу от Новосибирских о-вов, но повышенная ледовитость обнаруживается в Чукотском море и на востоке моря Бофорта. По температуре воздуха Арктика разделилась на две части: положительная аномалия в Российском секторе и отрицательная – в Североамериканском.

Для анализа неопределенностей, возникающих при проведении анализа канонического анализа по методу, предложенному в работе (Barnett, Preisendorfer, 1987), мы рассмотрели комбинацию двух вариантов нормализации исходных данных температуры воздуха (1982–2007 гг. и 1948–2009 гг.) и двух вариантов интервалов для выделения ГК (1982–2007 гг. и 1948–2009 гг.). В итоге получилось четыре варианта. Для второй и четвертой ГК нормализация и период применения анализа главных компонент существенно не изменяются при рассмотрении наблюдаемого периода (1982–2007 гг.). Близки друг к другу для всех первых четырех компонент варианты, когда анализ главных компонент проводится по периоду 1982–2007 гг. Для второй, третьей и четвертой компоненты наибольшие расхождения между возможными периодами нормализации и анализа главных компонент проявляются лишь для трех последовательных реконструируемых лет (1948–1950 гг.), поэтому при рассмотрении исторического прогнозирования при увеличении интервала реконструкции, возможно, необходимо применение некоторого сглаживания. Такое сглаживание имеет определенный смысл, так как позволяет от погоды в краткосроч-

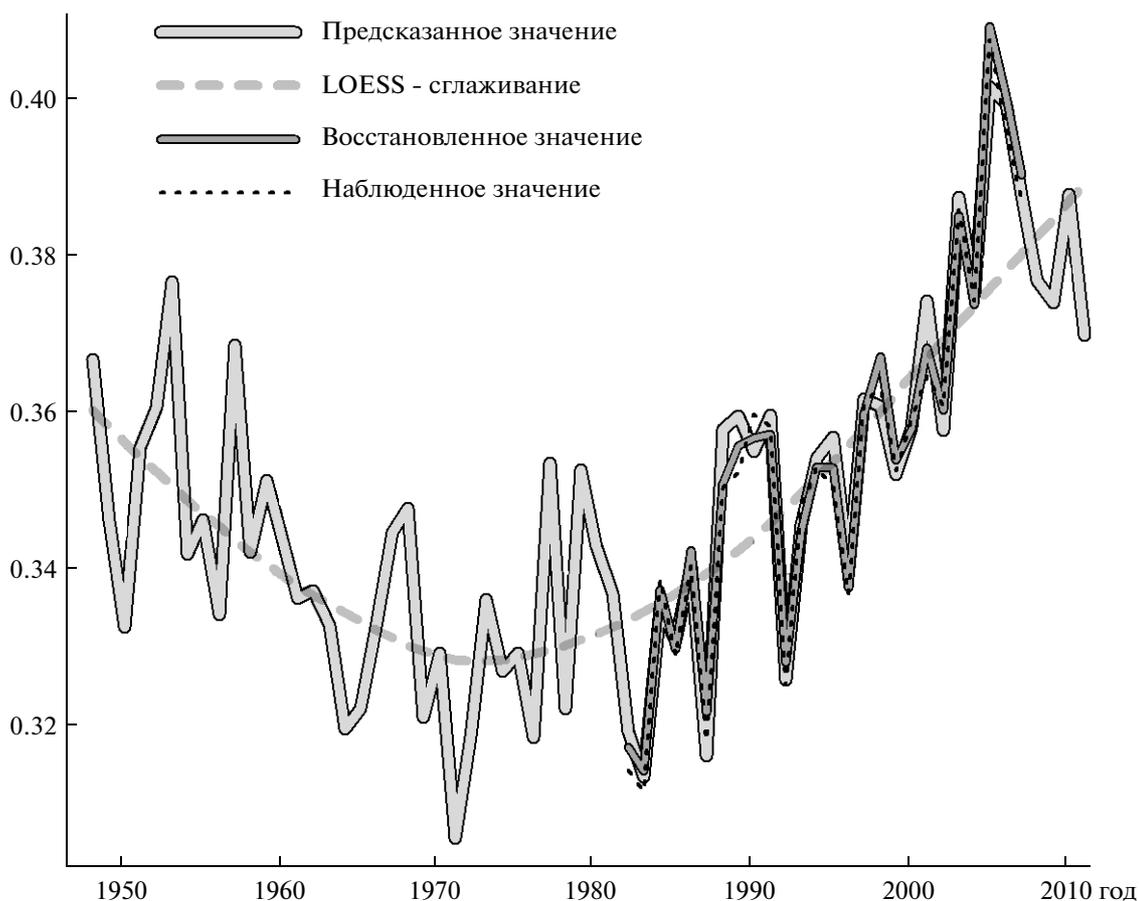


Рис. 6. Усредненный NDVI в июне по наблюдаемым и модельным значениям для территории севернее 50° с.ш.

ном периоде переходить к климату в долгосрочном интервале времени.

В течение спутниковой эры оценки NDVI первая ГК, объясняющая более трети вариации, хорошо согласуется с тенденцией более ранних сроков начала вегетационного сезона в северных широтах, о чем достаточно часто упоминается в научных публикациях, в том числе в работе (Slayback et al., 2003). Восстановленный в результате анализа канонических корреляций ретроспективный прогноз индекса растительности указывает на то, что спутниковая эра совпала с периодом, близким к локальному минимуму. Как было отмечено выше, вторая, третья и четвертая ГК имеют высокую межгодовую вариабельность и статистически незначимый линейный тренд в долгосрочной ретроспективе. Если судить по первой ГК, июнь 1971 г. был одним из самых экстремальных с минимальным индексом растительности за более чем 60 лет модельной ретроспективы.

На рис. 6 представлен временной ряд усредненного по обоим полушариям севернее 50° с.ш. индекса растительности в июне. Наблюдаемые значения охватывают интервал 1982–2007 гг. (короткий черный пунктир). Как в случае первой ГК,

минимальное значение индекса наблюдалось в 1983 г., а максимальное — в 2005 г. Темной серой линией отложено восстановленное по первым четырем ГК значение индекса растительности (1982–2007 гг.). Отмечается очень хорошая согласованность между наблюдаемыми и восстановленными значениями.

Историческая реконструкция NDVI в июне построена для периода 1948–2011 гг. по модели АКК с использованием температуры воздуха в мае в качестве предиктора. Для периода 1982–2007 гг. модельные и наблюдаемые данные высоко коррелированы и не смещены. По модельным данным для периода наблюдения также отмечается минимум в 1983 г. и максимум в 2005 г. Так же, как и для первой ГК NDVI, абсолютный минимум зафиксирован в 1971 г. Серой пунктирной линией отображено LOESS-сглаживание (Cleveland et al., 1988), с размером области для локального приближения, равным 2/3. По этому приближению в начале 1970-х отмечается задержка растительной фенологии: в 1950–1960 гг. наблюдается уменьшение индекса растительности, а с середины 1970-х — рост. За более чем шестидесятилетний срок не удастся обнаружить полного периода ко-

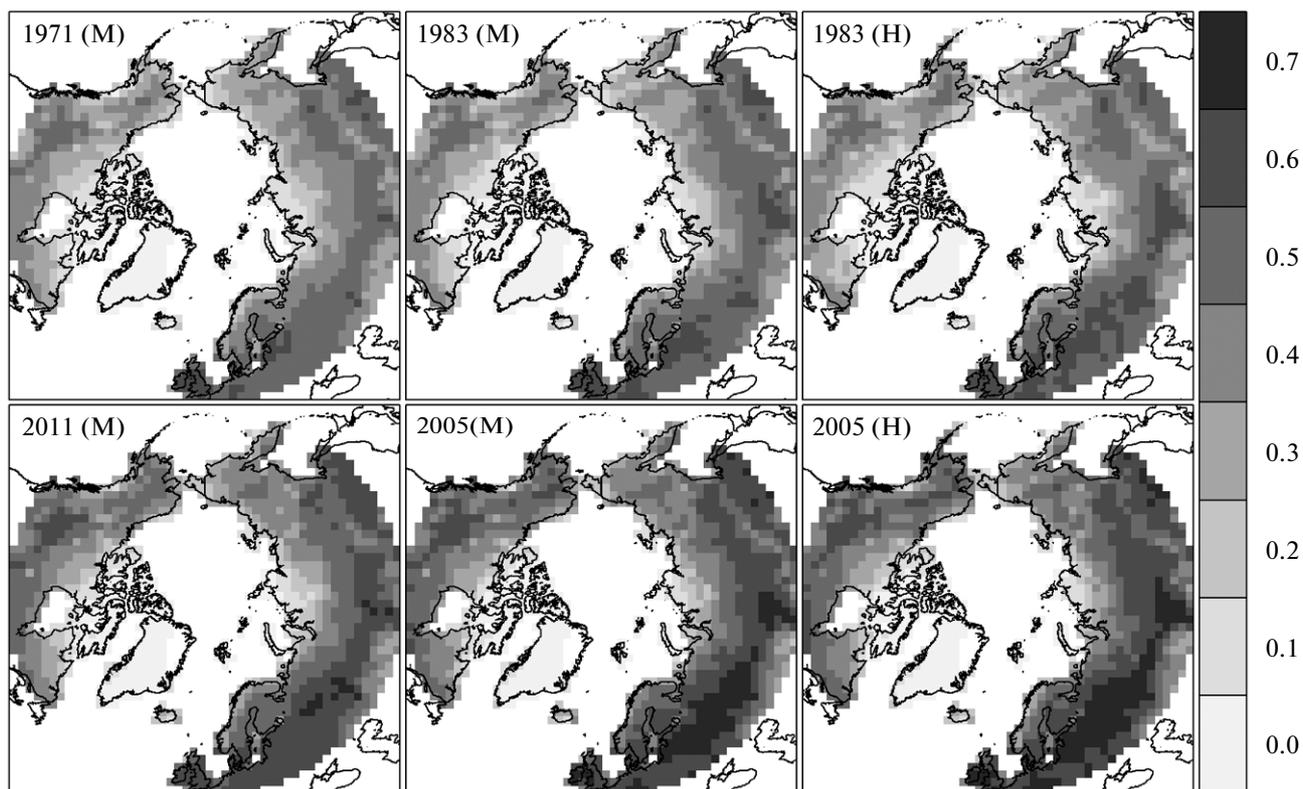


Рис. 7. Пространственное распределение NDVI по модельным значениям в июне 1971, 1983, 2005 и 2011 гг. (метка “М”) и наблюдаемым значениям в 1983 и 2005 гг. (метка “Н”).

лебаний NDVI, отсюда следует, что если растительная фенология изменяется циклично, то периодичность таких изменений оценивается десятилетиями.

Первая ЭОФ объясняет более трети общей вариации, поэтому пространственное распределение реконструированных и предсказанных значений будет отражать пространственный рисунок этой моды. Выборочные карты по модельным и наблюдаемым значениям NDVI приведены на рис. 7. Для 1983 и 2005 гг. доступны как наблюдаемые, так и модельные значения (вторая и третья колонки). Для 2005 г. отмечается ранняя растительная фенология для Европейской части России как по модельным данным, так и по результатам наблюдений. В целом и для 1983 г., и для 2005 г. прослеживается пространственное сходство результатов.

При анализе аномалий в качестве долгосрочного и базового периода использован период 1982–2007 гг. По модельным данным, и в 1971 г., и в 1983 г. на всем участке суши севернее 50° с.ш. в обоих полушариях преобладает отрицательная аномалия NDVI, за исключением одного региона – Северо-Сибирской низменности и северной части Среднесибирского плоскогорья. Для этого же региона в 2005 г. предсказывался повышенный индекс растительности, а в 2011 г. значение индекса оце-

нивалось близким к среднему. Наиболее сильная отрицательная аномалия NDVI в 1971 г. проявилась на Аляске и Чукотке. Высокое значение NDVI в июне 2005 г. проявляется на п-ове Лабрадор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При рассмотрении влияния ледовой обстановки на развитие вегетационного сезона или влияния вегетационного роста на изменения ледовой обстановки, сильнее прослеживается связь, при которой сроки оценки уровня вегетационного роста предшествуют срокам оценки ледовой обстановки. Сезонность характерна для обоих параметров. При количественной оценке связи наиболее существенны морские регионы на границе арктических паковых льдов в начале лета и сухопутные районы в прибрежной зоне арктического бассейна. Большее значение NDVI в прибрежной зоне обычно предшествует раннему таянию льда в районе арктического шельфа, и наоборот.

В долгосрочной ретроспективе выраженные пространственные структуры июньской вегетационной фенологии в северных широтах отражают задержку растительного роста в начале вегетационного периода в 1950–1960 гг. Дальнейший тренд к изменению сроков начала вегетационно-

го сезона согласуется с периодами более холодной или более теплой температуры в мае.

Вторые и последующие ГК и ЭОФ растительной фенологии в июне регионально неоднородны. Они имеют высокую межгодовую изменчивость с незначительным трендом изменения во времени. Такая неоднородность, вероятно, является проявлением не климатических (из года в год), а погодных (в зависимости от года) изменений в весенний период в интенсивности, позиции и характере изменения доминирующих синоптических центров атмосферного давления, таких, как Исландский минимум, Алеутский минимум, Сибирский максимум, Бофортский максимум. От этого зависит интенсивность зонального перемещения теплых масс в Арктику и холодных — в южные широты, а также изолированность арктической климатической подсистемы от планетарного климата.

При ярко выраженном Алеутском минимуме и ослабленном Бофортском максимуме происходит усиление переноса тепла в Арктику из южных широт (высокий индекс растительности в тихоокеанском секторе в 2004 г.). Если выражены оба эти атмосферных центра, то возникающий диполь вызывает зональные перемещения воздушных масс (1988, 1993 гг.). Эффект региональных изменений вегетационного роста на Чукотке и Аляске зависит от взаимного расположения центров диполя. Исландский минимум оказывает влияние на северо-западную часть Евразии (позднее начало вегетационного сезона в Европе в 1987 г.).

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований ОБН РАН “Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга” и Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” Министерства образования и науки РФ (Госконтракт № 14.740.11.0410).

Мы признательны Дэвиду Дагласу (David C. Douglas, Alaska Science Center, USGS) за предоставленные для анализа данные NDVI, критические замечания и рекомендации при выполнении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Barnett T.P., Preisendorfer R.* Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis // *Monthly Weather Rev.* 1987. V. 115. № 9. P. 1825–1850.
- Brodzik M.J., Knowles K.W.* EASE-Grid: A versatile set of equal-area projections and grids in *Discrete Global Grids* / Ed.: Goodchild M. 2002. http://www.ncgia.ucsb.edu/globalgrids-book/ease_grid/
- Cao M., Prince S.D., Small J., Goetz S.J.* Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981–2000 // *Ecosystems.* 2004. V. 7. P. 233–242.
- Cleveland W.S., Devlin S.J.* Locally-Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting // *J. Amer. Stat. Assoc.* 1988. V. 83. № 403. P. 596–610.
- Cox T.F., Cox M.A.A.* *Multidimensional Scaling.* Chapman & Hall, 2001.
- Griffith B. et al.* Porcupine caribou herd, in *Arctic Refuge coastal plain terrestrial wildlife research summaries* / Eds.: Douglas D.C. et al. U.S. Geol. Surv., Biol. Resour. Div., Biol. Sci. Rep. 2002-0001. 2002. P. 8–37.
- Raynolds M., Comiso J.C., Walker D.A., Verbyla D.* Relationship between satellite-derived land surface temperatures, arctic vegetation types, and NDVI // *Rem. Sens. Environ.* 2008. V. 112. P. 1884–1894.
- Sammon J.W.* A non-linear mapping for data structure analysis // *IEEE Trans. Comput.* 1969. V. C-18. P. 401–409.
- Slayback D.A., Pinzon J.E., Los S.O., Tucker C.J.* Northern hemisphere photosynthetic trends 1982–99 // *Global Change Biol.* 2003. V. 9. P. 1–15.
- Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D.A., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E.F., El Saleous N.* An extended AVHRR 8-km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data // *Int. J. Rem. Sens.* 2005. V. 26. P. 4485–4498.

Estimation of the Relationship between the Subarctic Vegetations and Climatic Parameters

N. G. Platonov, I. N. Mordvintsev, I. V. Alpatsky

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow

In this study we examined relationships between vegetation phenology and the physical environment across the mid-latitudes of the Northern Hemisphere between 1982 and 2007. Spatial correlation, principal component analysis, and canonical correlation analyses — all these linear techniques were applied to monthly time-series of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), derived from AVHRR sensor, sea ice distribution (SSMR-SSM/I), and air temperature (NCEP/NCAR Reanalysis Atlas). Negative correlation between June NDVI of tundra belt and sea ice conservation in coastal zone of Arctic Ocean during summer, possible, is forced by broad-scale atmospheric circulation. We developed a model with single predictor and implemented historical reconstruction NDVI for a long-term period, including pre-satellite era. According this model, the regional patterns of summer vegetation can be explained by peculiarity of atmospheric circulation during spring.

Keywords: satellite monitoring, vegetation phenology, Normalized Difference Vegetation Index, sea ice concentration, air temperature, tundra, coastal zone of Arctic Ocean