



Обзор

Изменения вегетационного периода за последнее столетие

Ганс В. Линдерхольм

a, б, *

^a Региональная климатическая группа, Центр наук о Земле, Гетеборгский университет, SE-405 30 Гетеборг, Швеция^б Лаборатория климатических исследований Национального климатического центра Китайской метеорологической администрации, 46 Zhongguancun Nandajie, Хайдянь, Пекин 100081, Китай

Получено 26 сентября 2005 г.; получено в измененном виде 24 февраля 2006 г.; принято 13 марта 2006 г.

Абстрактный

Все больше исследований сообщают об изменениях в сроках и продолжительности вегетационного периода, основанных на фенологических, спутниковых и климатологических исследованиях. Данные указывают на удлинение вегетационного периода примерно на 10–20 дней за последние несколько десятилетий, где более раннее начало является наиболее заметным. Это удлинение вегетационного периода было связано с недавним глобальным потеплением. Изменения в сроках и продолжительности вегетационного периода (GSL) могут не только иметь далеко идущие последствия для растительных и животных экосистем, но и постоянное увеличение GSL может привести к долгосрочному увеличению запасов углерода и изменениям в растительном покрове, которые могут повлиять на климатическую систему. В этой статье рассматривается недавняя литература, посвященная изменчивости GSL.

2006 Elsevier BV Все права защищены.

Ключевые слова: Продолжительность вегетационного периода; Фенология; NDVI; Изменение климата

1. Введение

За 20-й век глобальная средняя температура поверхности увеличилась на 0,6–0,8°C, причем большая часть потепления произошла между 1976 и 2000 годами, и, по прогнозам, увеличится на 1,4–5,8°C за период 1990–2100 годов (МГЭИК, 2001). Кроме того, МГЭИК (2001) заявила, что «большая часть наблюдаемого потепления за последние 50 лет, вероятно, была вызвана ростом концентрации парниковых газов», где CO₂ имеет самое сильное радиационное воздействие. Климатические модели потепляющего мира предсказывают, что ряд климатических, погодных и биологических явлений будут затронуты растущей концентрацией CO₂ в атмосфере. Одним из таких явлений является продолжительность вегетационного периода (GSL), т. е. период между распусканием почек и опадением листьев, который, как ожидается, увеличится, особенно в более высоких широтах (EEA, 2004). GSL представляет значительный интерес, поскольку он оказывает сильное влияние на функционирование экосистемы (White et al., 1999).

Изменения GSL являются полезным климатическим индикатором и имеют несколько важных климатологических применений (Robeson, 2002). Уменьшение GSL может привести, например, к изменению дат посадки, определяя более низкую урожайность традиционно высаживаемых культур, которые могут не полностью созреть. Однако увеличение GSL может предоставить возможности для более ранней посадки, обеспечивая созревание и даже возможности для многократного сбора урожая (в зависимости от доступности воды). Килинг и др. (1996) показали связь между температурой приземного воздуха и изменениями в сроках и амплитуде сезонного цикла атмосферного CO₂. Это согласуется с идеей о том, что более высокие температуры способствуют увеличению роста растений летом и/или дыхания зимой. Увеличение годовой амплитуды сезонного цикла CO₂ на 40% в Арктике (на 20% на Гавайях) с начала 1960-х годов было связано с удлинением вегетационного периода примерно на 7 дней.

Барфорд и др. (2001) обнаружили, что сезонные и годовые колебания поглощения CO₂ в северном лиственном лесу регулировались погодой и сезонным климатом (например, изменениями в продолжительности вегетационного периода). Минени и др. (1997) показали, что увеличение фотосинтетического

* Тел.: +46 31 773 2887; факс: +46 31 773 1986.

Адрес электронной почты: hansi@gvc.gu.se.

активность наземной растительности, наблюдаемая со спутника данные за период 1981–1991 гг. предполагали увеличение в росте растений, связанном с удлинением активного вегетационный период. Следовательно, стойкий увеличение GSL может привести к долгосрочному увеличению хранение углерода (Уайт и др., 1999).

Становится очевидным, что исследования растущего сезон растительности на суше стал важным научная проблема для исследования глобального изменения климата (Чен и др., 2000). В последних исследованиях использовались три основных метода определения вегетационного периода изменение в 20 веке; фенология, нормализованная индекс разницы вегетации (NDVI) по спутниковым данным, и температуры воздуха на поверхности. В этой статье рассматриваются некоторые из наиболее важных результатов недавних исследований GSL, группируя их в три области обсуждения. [Таблица 1](#)

Таблица 1
Наблюдаемые изменения параметров вегетационного периода, как видно из фенологических записей (P), нормализованный индекс разности вегетации (NDVI) со спутников, и климатологические записи (C)

Тип	Промежуток времени	Географический диапазон	Число сайтов	Изменение (дней)			Ссылка
				Начинать	Конец	Длина	
П	1980–2000	Великобритания		5.5			Спаркс и др. (2005)
П	1991–2000	Великобритания	1 1	4.5			Монтажник и монтажник (2002)
П	1951–1996	Германия	1000			9.2	Менцель и др. (2001)
П	1961–2000	Германия	22	9.2			Хмелевский и др. (2004)
П	1952–2000	Испания		16	13	29	Пенуэлас и др. (2002)
П	1930–1998	Северо-Запад России				15 до 20	Козлов и Берлина (2002)
П	1951–1996	Европа	1	6.3	4.5	10,8	Менцель и Фабиан (1999)
П	1951–1998	С & W Европа	1 80 104с	28			Ахас и др. (2002)
П	1951–1998	Восточная Европа		+7 до +14 8			Ахас и др. (2002)
П	1969–1998	Европа	50	8			Хмелевский и Рётцер (2002)
П	1936–1996а	Канада	NA				Бобиен и Фриланд (2000)
П	1936–1998b	Северо-восточная часть США	1	7			Брэдли и др. (1999)
П	1970–1999	Восточная часть США	NA	2.4			Абу-Асаб и др. (2001)
П	1965–2001 гг.	Северо-Восток США	72	2-8			Вулф и др. (2005)
П	1922–2004	Корея	1	13			Хо и др. (2006)
НДВИ	1982–1993	Китай				17	Чен и др. (2005)
NDVI	1982–2000	Европа		10.8		19.2	Штокли и Видейл (2004)
NDVI	1981–1999	Евразия		7		18	Чжоу и др. (2001)
NDVI	1981–1999	Северная Америка		8		12	Чжоу и др. (2001)
НДВИ	1982–1991	458–758 с.ш.		6		4	Такер и др. (2001)
НДВИ	1992–1999	458–758 с.ш.		2		0.4	Такер и др. (2001)
NDVI	1981–1991 1890–	Глобальный		8		12	Минени и др. (1997)
С	1995 1951–	Фенноскандия	9	4-12 6.3	1–9	7–21	Картер (1998)
С	2000 1950–	Большая Балтийская Зона	36		1.3	7,4	Линдерхольм и др. (2006)
С	2000 1961–	Германия	41	6.5-12	12.5	5,5–24,5	Менцель и др. (2003)
С	1990	Австрия	20			11	Хазенауэр и др. (1999)
С	1899–1982	Северная Каролина, США	3d			14	Скаггс и Бейкер (1985)
С	1906–1997	ЕС США 1959–1993	36				Робсон (2002)
С		Китай	147	6	4	7	Шварц и Чен (2002)
С	1964–1992	Нью-Гэмпшир				10 7	Килинг и др. (1996)

^a 1936–1961, 1973–1982 и 1987–1996. 1936–1947
^b и 1976–1998.
^c
^c Центральная, Западная и Восточная Европа.
^г Средний показатель для трех из пяти использованных станций.

обобщает исследования, в которых были количественно оценены изменения в параметрах вегетационного периода. Кроме того, Кратко обсуждаются последствия изменения GSL.

2. Фенология

2.1. Значение фенологии в глобальных изменениях исследования

Фенологию можно определить как: «изучение время повторяющихся биологических фаз, причины их синхронизация с учетом биотических и абиотических сил, и взаимосвязь между фазами одного и того же или разные виды" (Глобальный фенологический мониторинг, <http://www.dow.wau.nl/msa/gpm/>). В умеренных зонах репродуктивные циклы растений контролируются в первую очередь

по температуре и продолжительности дня (Menzel, 2002), тогда как в более низких широтах необходимо учитывать осадки и эвапотранспирацию (например, Spano et al., 1999). Сроки весенних событий у растений средних и высоких широт, таких как бутонизация, распускание листьев и цветение, в основном регулируются температурами после выхода из состояния покоя, и ряд исследований обнаружили хорошую корреляцию между весенними фазами и температурами воздуха (Menzel и Fabian, 1999; Wielgolaski, 1999; Abu-Asab и др., 2001; Chmielewski и Rötter, 2002; Fitter и Fitter, 2002; Sparks и Menzel, 2002; Chmielewski и др., 2004). Таким образом, фенологические фазы могут служить косвенными показателями весенних температур. В то время как климатический сигнал, контролирующий весеннюю фенологию, достаточно хорошо изучен, осенняя фенология менее четко объяснена с точки зрения климата (Walther et al., 2002), возможно, потому, что временные изменения осенью кажутся менее выраженными и демонстрируют более неоднородные закономерности (Menzel, 2002). Несколько исследований связывают межгодовую изменчивость фенологии с крупномасштабными погодными особенностями, такими как Североатлантическое колебание (NAO) и Эль-Ниньо-Южное колебание (ENSO) (D'Odorico et al., 2002; Stenseth et al., 2002; Menzel, 2003; Menzel et al., 2005). Изменения в фенологии растений считаются наиболее чувствительным и наблюдаемым индикатором реакции растений на изменение климата. К сожалению, существует мало фенологических записей, которые выходят за рамки инструментальных записей, например, фенологическая запись Маршама в Великобритании, охватывающая более двух столетий (Sparks and Carey, 1995), и связь между фенологическими записями и температурой может быть нарушена другими факторами окружающей среды (Menzel, 2003). Поскольку неклиматические влияния (например, изменение землепользования) доминируют над локальными, краткосрочными биологическими изменениями, приписывание недавних биологических изменений глобальному потеплению является сложным (Parmesan and Yohe, 2003). Однако существует большой потенциал для использования фенологических наблюдений для оценки экологических реакций на изменение климата, а сбор данных в программы фенологических наблюдений обеспечивает наборы данных для оценки пространственных и временных воздействий климата на растительность и животных (например, Хмелевский и Рётцер, 2002 г.; Ван Влит и др., 2003). Кроме того, фенология продемонстрировала значительные перспективы в решении вопросов глобального моделирования (например, масштабирования), мониторинга и оценки воздействия изменения климата (Шварц, 1999).

2.2 Наблюдаемые фенологические изменения в 20 веке

Недавнее внимание к фенологии отчасти обусловлено большим количеством исследований, документирующих долгосрочные

изменения термина в фенологии, которые были связаны с глобальными изменениями. Из-за большого количества доступных фенологических данных, а также создания банков данных, доминируют крупномасштабные европейские фенологические исследования. Однако из-за повышенного внимания к фенологии больше данных анализируется в других частях мира. Следующий обзор недавно опубликованных результатов будет в основном сосредоточен на фенологии наземных растений. Однако существует большое количество исследований изменений в фенологии видов животных, например, миграции (Bradley et al., 1999; Pen˜uelas et al., 2002; Cotton, 2003) и размножения (Crick et al., 1998; Forchhammer et al., 1998; Crick and Sparks, 1999), все из которых указали на недавние воздействия глобальных изменений (см. также McCarthy, 2001; Walther et al., 2002).

2.2.1. Локальные

исследования 2.2.1.1. Европа. Чтобы предсказать будущие реакции видов на изменившийся климат, необходимо знать, как растения реагировали на климат в прошлом. К сожалению, лишь немногие фенологические записи достаточно длинны, чтобы показать реакции на естественную изменчивость климата. Однако существуют фенологические записи, которые выходят за рамки 20-го века. Спаркс и Кэри (1995) изучили фенологическую запись Маршама (1736–1947). Это запись первых дат наблюдений или указаний на весну для 27 фенологических событий в семейных поместьях Маршама на юго-востоке Англии. 27 фенологических событий произошли от таксонов, распространенных в британской сельской местности. Были обнаружены четкие связи между фенологическими событиями и погодой ранней весны.

В течение анализируемого периода наблюдалось повышение температуры, и виды отреагировали на это, некоторые из них раньше стали ходить в листья или цвести, другие позже стали ходить в листья или цвести. Они также оценили, как будущее повышение температуры на 3,5 8C зимой и на 3 8C вне зимы, вместе с увеличением осадков, повлияет на наблюдаемые виды. Результаты показали резкое изменение реакции видов, при этом виды появлялись на 2–3 недели раньше, чем сейчас. Ахас (1999) изучал фенологические временные ряды (от 132 до 44 лет) восьми распространенных видов растений, рыб и птиц в трех различных точках наблюдения в Эстонии.

Был сделан вывод, что за 80-летний период исследований весна в Эстонии в среднем сдвинулась на 8 дней вперед, а за последний 40-летний период потепление наблюдалось еще быстрее.

Более того, в прибрежных районах весна наступала примерно в два раза быстрее, чем во внутренних районах.

Эта разница связана с температурным режимом и ледовым покровом Балтийского моря, где холодная зима с устойчивым ледовым покровом вызовет следующее:

Весна будет очень поздней в прибрежном регионе, в то время как внутренние районы прогреваются быстрее, и весна наступит гораздо раньше, и наоборот. Полученные в результате более значительные изменения, наблюдаемые в фенологических данных для морского климата, меняют гипотезу о том, что морское влияние является в целом стабилизирующим сезонным фактором. Менцель и др. (2001) проанализировали фенологические сезоны в Германии за более чем четыре десятилетия (1951–1996) и обнаружили явные сдвиги в ключевых показателях ранней и ранней весны (от 0,18 до 0,23 дней/год) и заметные сдвиги в последующих весенних фенофазах, таких как развертывание листьев лиственных деревьев (от 0,16 до 0,08 дней/год). Однако фенологические изменения были менее выраженными осенью (задержка в среднем от +0,03 до +0,10 дней/год). В целом вегетационный период удлинился на 0,2 дня/год, где средний вегетационный период 1974–1996 годов был на 5 дней длиннее, чем в период 1951–1973 годов. Фиттер и Фиттер (2002) отметили значительный сдвиг в дате первого цветения (FFD) у британских растений с 1980-х годов после четырех десятилетий небольших изменений. В среднем FFD изученных 385 видов растений сдвинулся на 4,5 дня; 16% показали среднее опережение на 15 дней. Поскольку FFD чувствителен к температуре, изменение в 1990-х годах было приписано потеплению климата. Изучение большого количества фенологических записей, которые вел фермер в Сассексе, Великобритания, с 1980 по 2000 год, показало, что 25 из 29 событий произошли раньше в 1990–2000 годах, чем в 1980–1989 годах (Sparks et al., 2005). Среднее опережение всех событий составило 5,5 дня, и более половины событий были в значительной степени связаны с температурами 3 месяцев, предшествовавших средней дате события.

2.2.1.2. Северная Америка. За 61-летний период (1936–1947 и 1976–1998) в южном Висконсине было изучено 55 фенофаз (Bradley et al., 1999). Примерно треть фенофаз, по-видимому, сдвинулись вперед по ранности за этот период, а средняя тенденция для всех 55 фенофаз составила 0,12 дня/год. По мере наступления весны количество фенофаз, увеличивающихся по ранности, уменьшалось, что позволяет предположить, что наибольшее изменение фенофаз происходит ранней весной. В Канаде, где за последнее столетие были отмечены более теплые зимние и весенние температуры, даты первого цветения из Эдмонта, Альберта, извлеченные из четырех исторических наборов данных, показали постепенное более раннее развитие весеннего цветения (Beaubien and Freeland, 2000). Сроки цветения в значительной степени зависели от температуры, при этом более раннее цветение наблюдалось в годы с более высокими весенними температурами. Были обнаружены корреляции между более сильными явлениями Эль-Ниньо, более высокими температурами океана и более высокими температурами зимой и весной, а также ранним наступлением холодов.

цветение. За последние десятилетия в центральной Альберте наблюдалась тенденция к более раннему цветению на 8 дней, а раннее цветение *Populus tremuloides* показало 26-дневное изменение времени цветения в течение 20-го века. Абу-Асаб и др. (2001) исследовали тенденцию среднего «времени первого цветения» (которое определялось как стадия, на которой одно- или раздельнополый цветок начинает цветение или становится восприимчивым к пыльце) для 100 выбранных растений из района Вашингтона, округ Колумбия. Они обнаружили значительное опережение на 2,4 дня за 30-летний период, и за исключением 11 растений, которые продемонстрировали более позднее время первого цветения, остальные 89 видов показали значительное опережение на 4,5 дня. Опережение первого цветения у 89 видов напрямую коррелировало с повышением местных минимальных температур. Кайан и др. (2001) описали колебания весеннего климата на западе США с 1950-х годов, изучив изменения данных Фенологической сети Западного региона о первом цветении сирени и жимолости, а также о сроках импульсов таяния снега и стока. Оба отчета показали годовые колебания (обычно 1–3 недели), которые были регионально согласованы для большей части запада. Анализы показали, что аномальная температура оказала наибольшее влияние как на межгодовые, так и на вековые изменения в наступлении весны в этих сетях. Отчеты показали более раннее наступление весны с конца 1970-х годов, когда даты цветения (и весенние импульсы) происходили на 5–10 дней раньше, чем в предыдущей части отчета, что отражает необычный период более теплых, чем обычно, весен на западе Северной Америки в этот период. Теплые эпизоды были явно связаны с более масштабными атмосферными условиями по всей Северной Америке и северной части Тихого океана, но является ли это преимущественно выражением естественной изменчивости или также симптомом глобального потепления, неизвестно. Вулф и др. (2005) оценили дату первого листа (FLD) и FFD древесных растений (сирень, яблоня и виноград) за период 1965–2001 гг. в северо-восточных частях США. Они пришли к выводу, что общая тенденция потепления за последние несколько десятилетий на северо-востоке США привела к ускорению весенней фенологии на 2–8 дней для изучаемых видов.

2.2.1.3. Азия. Чжэн и др. (2002) проанализировали изменение фенофазы растений весной и влияние потепления климата на фенофазу растений в Китае за последние 40 лет, используя данные фенологии растений с 26 станций Китайской сети наблюдений за фенологией. Они показали, что реакция опережения (или задержки) фенофазы на изменение температуры была нелинейной. Скорость дней опережения фенофазы уменьшается с амплитудой повышения температуры, а скорость дней задержки фенофазы увеличивается с понижением температуры.

амплитуда. С 1980-х годов фенофазы продвинулись вперед в северном и северо-восточном Китае, а также в нижнем течении реки Чанцзян (Янцзы) и задержались в восточной части юго-западного Китая и в среднем течении реки Чанцзян. Кроме того, скорость разницы фенофаз уменьшалась с широтой. Используя простую фенологическую модель, основанную на минимальных и максимальных температурах на уровне поверхности, Шварц и Чен (2002) обнаружили, что начало весеннего роста в Китае не претерпело видимых изменений в течение 1959–1993 годов, что контрастирует с результатами в Северной Америке и Европе.

Однако в это время даты последних весенних заморозков стали более ранними (6 дней), особенно в северо-восточной части страны, а даты первых заморозков стали более поздними (4 дня, особенно в северо-центральной части Китая), что привело к увеличению безморозного периода на 10 дней, в основном в северной части страны. В Сеуле, Корея, Хо и др. (2006) изучали долгосрочные (1922–2004) изменения в первом цветении пяти видов деревьев. Все виды показали опережение в весеннем цветении (от 1,4 до 2,4 дней/десятилетие для деревьев с ранним весенним цветением и 0,5 дня/десятилетие для деревьев с поздним весенним цветением), связанное с потеплением на 2 8C за 83 года.

2.2.1.4. Исследования в высоких широтах и на высоте. Ряд фенологических переменных в северной русской тайге были изучены Козловым и Берлиной (2002) с целью поиска возможных изменений в продолжительности вегетационного периода в период 1930–1998 гг. Они обнаружили, что таяние снега весной происходило на 16 дней позже, а даты установления постоянного снежного покрова в лесах начинались на 13 дней раньше в конце периода исследования, чем в его начале. Кроме того, продолжительность периодов без снега и льда в лесах сократилась на 15–20 дней за 68-летний период. Был сделан вывод, что продолжительность вегетационного периода на Кольском полуострове сократилась за последние 60 лет из-за запоздалой весны и более ранней осени/зимы. Аналогичные результаты были получены в Скалистых горах Колорадо, США, где Иноуйе и др. (2000) не обнаружили существенных изменений в начале вегетационного периода в период 1975–1999 гг. Здесь начало вегетационного периода контролируется таянием снежного покрова предыдущей зимы, и, несмотря на тенденцию к более теплым весенним температурам, даты таяния снега не изменились, возможно, из-за увеличения количества зимних осадков.

Однако мигранты и зимующие, по-видимому, отреагировали на повышение температуры, прибывая (американские малиновки) и вылезая (желтобрюхие сурки) раньше (на 14 и 38 дней соответственно). Сочетание изменений в зимнем снежном покрове (начинается раньше и длится дольше) и повышение температуры воздуха на больших высотах

может нарушить исторические закономерности для видов, впадающих в спячку и мигрирующих.

2.2.2 Региональные и глобальные исследования

Менцель и Фабиан (1999) и Менцель (2000) проанализировали данные наблюдений из Международных фенологических садов (IPG). IPG представляет собой общеевропейскую сеть с большим пространственным покрытием (428N–698N, 108W–278E), которая содержит генетические клоны деревьев и кустарников, а даты фаз, таких как развертывание листьев, цветение и листопад, собираются с 1959 года.

Анализы показали, что за последние четыре десятилетия (1959–1996) весенние события в среднем опережали на 6,3 дня, а осенние события задерживались в среднем на 4,5 дня, что привело к среднему удлинению вегетационного периода на 10,8 дня. Удлинение вегетационного периода было связано с современным повышением температуры. Хмелевский и Ротцер (2002) также использовали данные IPG для исследования начала вегетационного периода (BGS) по всей Европе за период 1969–1998 гг. Используя канонический корреляционный анализ, они установили связь между температурами воздуха в феврале-апреле и BGS, где были связаны температуры выше (ниже) нормы во всей Европе и опережающие (запаздывающие) BGS. В последнее десятилетие периода их исследования ранние весенние температуры увеличились примерно на 0,8 8C, что привело к опережению BGS на 8 дней. Ахас и др. (2002) проанализировали данные из Европейской фитофенологической базы данных (составленной из различных национальных баз данных Восточной и Западной Европы) за период 1951–1998 гг.

Результаты показали, что в Западной и Центральной Европе весенняя фаза наступила на 4 недели раньше из-за усиления потока теплых атлантических воздушных масс в

связь с сильным NAO. Продвижение в Восточной Европе было слабее, до 2 недель. Были некоторые исключения, с тенденциями к задержке начала весенней фазы, в Восточной Европе, которые были связаны с сибирской системой высокого давления. Рут и др. (2003) рассчитали линейные тренды и проанализировали наклоны регрессии для ряда исследований весенней фенологии за последние 50 лет. Анализ был основан на 61 исследовании, сообщающих результаты по 694 видам растений и животных. Для включения исследований использовался набор критериев; временной ряд должен иметь длину не менее 10 лет, должно быть обнаружено изменение по крайней мере одного анализируемого признака и должна быть обнаружена либо временная тенденция температуры, либо сильная связь между признаком и температурой участка.

Расчетное среднее число дней продвижения в фенологических фазах за десятилетие составило 5,1 со стандартной ошибкой (SE), равной 0,1. Поскольку тенденция к потеплению выше в более высоких широтах, отдельные

Анализы были выполнены для широтных поясов 32–49,98 с.ш. и 50–728 с.ш., в результате чего тренды за десятилетие составили 4,2 (0,2 ЮВ) и 5,5 (0,1 ЮВ) соответственно.

Пармезан и Йохе (2003) количественно оценили 667 фенологических сдвигов у видов, описанных в литературе. В диапазоне временного периода от 16 до 132 лет 62% показали тенденции к опережению весенних событий, в то время как 9% показали тенденции к задержке весенних событий. Они провели метаанализ тенденций в фенологии для 172 видов, для которых были доступны временные ряды не менее 17 лет и наблюдения по крупным географическим регионам. Метаанализ привел к среднему опережению весенних фаз на 2,3 дня за десятилетие (95% доверительный интервал, 1,7–3,2). Как отметили Бадек и др. (2004), различия в оценках тенденций, предоставленных двумя вышеупомянутыми исследованиями, могут быть связаны с различиями в относительном количестве наблюдений в более высоких и более низких широтах, различными таксонами или группами фаз (цветение против распускания листьев; раннее против позднего) и/или с длиной анализируемого временного ряда.

2.3 Фенологические изменения и крупномасштабные погодные явления

В северной части Атлантического океана значительная доля межгодовой изменчивости климата обусловлена динамикой Североатлантического колебания (САК), которое является мерой разницы давления между Азорскими островами и Исландией и, следовательно, влияет на западные ветры, дующие через Северную Атлантику.

Сезоны высокого положительного NAO связаны с потеплением и увеличением количества осадков в Северо-Западной Европе (Hurrell, 1995). Эта связь наиболее выражена зимой и ранней весной и существенно слабее летом (Rogers, 1990). С конца 1960-х годов наблюдается усиление зимнего NAO с беспрецедентно высокими положительными значениями индекса NAO с 1970-х годов (Hurrell, 1995). Поскольку усиление NAO совпадает с глобальным потеплением конца 20-го века, влияние крупномасштабной атмосферной циркуляции на различные экосистемы привлекло повышенное внимание в регионе Северной Атлантики (например,

Пост и Стенсет, 1999 г.; Вейхенмейер и др., 1999; Мистеруд и др., 2000; Линдерхольм, 2002 г.; Сольберг и др., 2002; Стенсет и др., 2002).

Chmielewski и Rotzer (2001) использовали даты листопада деревьев из Международных фенологических садов за период 1969–1998 гг. для определения начала и конца вегетационного периода. Почти общеевропейское потепление ранней весной (февраль–апрель) за последние 30 лет (1969–1998 гг.) привело к более раннему началу вегетационного периода на 8 дней. Наблюдаемые тенденции в

Начало весны хорошо соответствовало изменениям температуры воздуха и циркуляции (индекс NAO) по всей Европе. В конце зимы и начале весны положительная фаза NAO явно увеличивалась, что приводило к преобладанию западных ветров и, следовательно, к более высоким температурам в период с февраля по апрель. С конца 1980-х годов изменения в циркуляции, температуре воздуха и начале весны были поразительными. Исследование показало, что потепление ранней весной (февраль–апрель) на 1 °C вызывает опережение начала вегетационного периода на 7 дней. Наблюдаемое продление вегетационного периода было в основном результатом более раннего наступления весны.

D'Odorico et al. (2002) также исследовали связь между более ранним началом вегетационного периода в Европе и более теплыми зимами, связанными с фазовыми изменениями в NAO. Они обнаружили, что весенняя фенология в Европе была значительно затронута NAO, где зимы с высоким NAO (теплые) ускоряли наступление весенних фенофаз (распускание почек и цветение). Кроме того, NAO может частично объяснить как высокочастотную, так и низкочастотную изменчивость фенологии растений Британских островов. Scheffinger et al. (2002) отметили связь между межгодовой изменчивостью в NAO и временной изменчивостью фенологических событий в Центральной Европе в 1951–1998 годах. Тенденция в фенологических временных рядах с конца 1980-х годов может быть в значительной степени объяснена NAO. Они показали, что влияние NAO было сильнее всего на ранних фазах и уменьшалось поздней весной. Влияние NAO уменьшалось с увеличением расстояния от побережья Атлантики, а также в горной местности. Менцель (2003) исследовала сезонные фазы из фенологической сети Немецкой службы погоды в связи с климатом и NAO в 1951–2000 гг. Используя регрессию между фенологическими аномалиями и NAO, она обнаружила довольно сильную связь между NAO февраля и марта и весенними фенологическими аномалиями (R^2 в диапазоне от 0,37 до 0,56), причем ранние весенние фазы были более чувствительны к NAO, и что NAO января–февраля объясняло около 40% дисперсии в продолжительности вегетационного периода.

Аналогичные результаты были получены Ахасом и др. (2004) для Европы (данные из Европейской базы данных по фенологии растений). Они изучали взаимосвязи между датами начала весенних фенологических фаз для трех видов и крупномасштабными моделями циркуляции в форме NAO и арктического колебания, АО, определяемого как почти осесимметричная пространственная модель межгодовой изменчивости зимнего давления на уровне моря в Северном полушарии с центром над Арктикой (Томпсон и Уоллес, 1998). В период 1951–1998 гг. самые высокие корреляции между весенними фенофазами и NAO/АО были обнаружены зимой (декабрь–март) и тремя первыми

месяцев года (январь–март) по всей Европе, где корреляции были особенно сильны в регионе Балтийского моря. В восточной части исследуемой области (вблизи Уральских гор) корреляции были противоположны остальной части исследуемой области.

Также в Северной Америке были предложены связи между крупномасштабными атмосферными условиями и изменениями в весенней фенологии. Корреляции индекса весеннего цветения с частотой событий Эль-Ниньо были обнаружены в западной Канаде (Боббен и Фриленд, 2000). Более раннее наступление весны с конца 1970-х годов в западной части США было связано со сдвигами в Тихоокеанском декадном колебании (PDO, определяемом как ведущий главный компонент изменчивости ежемесячной температуры морской поверхности в северной части Тихого океана; Мантуа и др., 1997) в исследовании Кайана и др. (2001).

3. Дистанционное зондирование

Картографирование земельного покрова создает архивы, которые используются для параметризации глобальных климатических моделей, и поскольку прогрессивное изменение земельного покрова в течение десятилетий представляет интерес, необходимы данные дистанционного зондирования с высоким разрешением (например, Ван и Тенхунен, 2004). В последние годы определение вегетационного периода крупномасштабной растительности суши стало важным вопросом в исследовании глобального изменения климата. Благодаря синоптическому охвату и повторным временным выборкам, которые предлагают спутники, данные дистанционного зондирования имеют большой потенциал для мониторинга динамики растительности в региональном и глобальном масштабах (Myneni et al., 1997; Zhang et al., 2003). Одним из самых ярких событий весной является первое появление листвы, обычно называемое «зеленой волной» (например, Шварц, 1998). Это заметное событие, и его можно хорошо запечатлеть на спутниковых снимках, которые затем можно использовать для калибровки данных дистанционного зондирования. Для количественной оценки пространственных и временных изменений в росте и активности растительности можно рассчитать индексы растительности по спутниковым снимкам. Одним из таких индексов растительности является нормализованный разностный индекс растительности (NDVI), который будет описан в следующей части.

3.1. NDVI

Данные NDVI фиксируют контраст между красным и ближним инфракрасным отражением растительности, что указывает на избыток и поглощение энергии пигментами листьев, такими как хлорофилл (Zhou et al., 2001). NDVI является общим биофизическим параметром, и он дает представление о «зелени» растительности, но не о типе почвенного покрова напрямую. Временной ряд NDVI

Однако значения могут разделять различные типы земельного покрова на основе их фенологии или сезонных сигналов (Wang and Tenhunen, 2004). Поскольку NDVI хорошо коррелирует с долей фотосинтетически активной радиации, поглощаемой растительным пологом (и, следовательно, площадью листьев, биомассой листьев и потенциальным фотосинтезом), его можно использовать в качестве косвенного показателя реакции растительности на изменения климата (Myneni et al., 1995). При исследовании изменений и изменчивости глобальной растительной активности предполагается, что изменения NDVI дают информацию о реакции растительности на климат. Однако многие факторы, не связанные с изменчивостью экосистемы, связанные с получением данных дистанционного зондирования (например, дрейф спутника, неопределенности калибровки, различия между датчиками спутников, двунаправленные и атмосферные эффекты и извержения вулканов), могут вызывать не связанную изменчивость NDVI, которая может быть интерпретирована как реальные изменения NDVI (Zhou et al., 2001 и ссылки в нем). Таким образом, много усилий направлено на разработку (и тестирование) поправок для обеспечения согласованных и калиброванных временных рядов для NDVI из спутниковых данных. Ранее данные NDVI были получены с помощью инструментов AVHRR (Advanced Very High-Resolution Radiometer), установленных на метеорологических спутниках в системе наблюдения за Землей NOAA/NASA или в Глобальном мониторинге и модельных исследованиях инвентаризации (GIMMS). Недавно была разработана новая сенсорная система MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), которая предлагает улучшенную калибровку и атмосферные поправки, а также более высокое пространственное разрешение по сравнению с AVHRR (Zhang et al., 2003; Beck et al., 2005). Обычно NDVI имеют глобальный охват, а данные имеют пространственное разрешение 1,1–8 км и временную частоту 10–15 дней, в то время как MODIS NDVI существуют с пространственным разрешением до 250 и 500 м для всего земного шара (Бек и др., 2005).

3.2. Изменение вегетационного периода по спутниковым данным

Myneni et al. (1997) исследовали два набора данных NDVI (из NOAA и GIMMS) с июля 1981 года по конец июня 1991 года, чтобы оценить фотосинтетическую активность наземной растительности. В этой статье сообщалось об увеличении фотосинтетической активности за этот период, и это было связано с удлинением активного вегетационного периода (AGS, периода, когда фотосинтез фактически происходит). Они оценили опережение AGS примерно на 8 дней и продление фазы спада AGS примерно на 4 дня, что привело к общему удлинению AGS на 12 дней. Более того, увеличение было наибольшим между 45°N и 70°N, областью, где заметное потепление весной произошло из-за более раннего таяния снегов. Этот результат, вместе с результатом Keeling

и др. (1996) (см. выше), указывает на повышенную биосферную активность в высоких северных широтах.

Чжоу и др. (2001) продлили период анализа данных NDVI, представленных Минени и др. (1997) до декабря 1999 года. Они обнаружили, что около 61% общей площади растительности между 408N и 708N в Евразии показали устойчивый рост NDVI в период вегетации от Центральной Европы через Сибирь до Алданского плато, области, которая в основном состоит из лесов и редколесий. Картина была не такой последовательной в Северной Америке. Кроме того, вегетационный период увеличился на 18 дней в Евразии и на 12 дней в Северной Америке, что было вызвано более ранней весной и поздней осенью. Уменьшение NDVI наблюдалось на севере Северной Америки и северо-востоке

Азии были интерпретированы как реакция на засуху, вызванную температурой. Дополнительный анализ NDVI более высоких северных широт, проведенный Такером и др. (2001) за период 1982–1999 гг., дал результаты, схожие с результатами предыдущих исследований: более раннее начало и увеличенная продолжительность вегетационного периода, что было реакцией на более высокие температуры. Кроме того, они отметили, что в 1992 году произошла задержка начала вегетационного периода, вызванная временным глобальным похолоданием, вызванным извержением горы. Извержение вулкана Пинатубо в 1991 году. Более того, их анализы показали, что в конце 1990-х годов в Евразии был более интенсивный фотосинтез, чем в Северной Америке, по сравнению с 1980-ми годами.

Stoockli и Vidale (2004) использовали данные NOAA/NASA Pathfinder NDVI для создания непрерывного набора данных по фенологии европейской растительности (10-дневное временное и 0,18 пространственное разрешение) за 1982–2001 годы. Они обнаружили сильную сезонную и межгодовую изменчивость в состоянии растительности поверхности суши Европы. Фенологические показатели указали на поздний и короткий вегетационный период в 1985–1987 годах, в дополнение к ранней и продолжительной активности в 1989, 1990, 1994 и 1995 годах. Также было показано, что весенняя фенология особенно хорошо коррелирует с аномалиями зимней температуры и зимним индексом североатлантического колебания (NAO). Тенденции в фенологических фазах показали общий сдвиг к более ранним (0,54 дня/год) и продолжительным (0,96 дня/год) периодам роста (статистически значимо), особенно для Центральной Европы. Hogda et al. (2001) провели региональное исследование изменений вегетационного периода в Фенноскандии, Дании и на Кольском полуострове с использованием набора данных GIMMS NDVI. В период 1981–1998 гг. они обнаружили задержку весны в альпийских поясах и северной бореальной зоне, где самая сильная задержка наблюдалась в самых континентальных частях северной бореальной зоны. В южной Фенноскандии и западной Норвегии весна началась раньше. Кроме того, осень задержалась на всей территории, за исключением самых

континентальная часть северной Скандинавии. Таким образом, GSL был продлен для всей области, за исключением северной континентальной части. Бек и др. (2005) используют данные MODIS NDVI для картирования начала весны 2000–2004 гг. в Фенноскандии. В течение этого короткого периода анализа они обнаружили большую временную и пространственную разницу в пределах области в наступлении весны, варьирующуюся более чем на 2 месяца в пределах исследуемой области и более чем на месяц между годами. Широта, градиенты высоты и расстояние от морей, по-видимому, были определяющими факторами.

Объединив фенологические и NDVI (из NOAA/NASA Pathfinder) данные с 1982 по 1993 год на семи станциях отбора проб в умеренном восточном Китае, Чен и др. (2005) определили даты начала и окончания вегетационного периода на семи фенологических станциях отбора проб для каждого года, а затем провели пространственную экстраполяцию параметров вегетационного периода на все возможные метеорологические станции в исследуемой области. Пространственные закономерности даты начала и окончания вегетационного периода значительно коррелировали с пространственными закономерностями средних температур воздуха весной и осенью соответственно. В отличие от некоторых результатов аналогичных исследований в Европе и Северной Америке, их результаты показали значительную задержку в датах окраски листьев, а также менее выраженное опережение дат разворачивания листьев с 1982 по 1993 год. Вегетационный период в Китае был продлен на 1,4–3,6 дня/год в северных частях, в среднем на 1,4 дня/год по всей исследуемой области. Очевидная задержка в датах окончания вегетационного периода была связана с региональным похолоданием с конца весны до лета, тогда как незначительное опережение дат начала соответствовало непоследовательным изменениям температурных тенденций с конца зимы до весны.

Кауфманн и др. (2004) попытались ответить на вопрос о том, каково физиологическое значение результатов, полученных Минени и др. (1997) и Чжоу и др. (2001). Они исследовали физиологические эффекты удлинения вегетационного периода и увеличения летней зелени в лесах северного полушария, изучая связь между NDVI и годичными кольцами. Они использовали временные ряды NDVI и данные годичных колец из 48 средне- и высокоширотных участков Северной Америки и Евразии. Они обнаружили корреляции между NDVI и годичными кольцами в июне и июле, но не в течение месяцев в начале или конце вегетационного периода. Это может означать, что опережение весной и задержка осенью вегетационного периода менее важны для физиологического состояния деревьев. Таким образом, хотя изменения в весеннее время могут быть легче обнаружены, летние изменения могут иметь большее влияние на наземный углеродный цикл.

4. Климатический вегетационный период

4.1 Определение климатологического периода вегетации

Климатологический «сезон» роста можно рассматривать как весь период, в течение которого теоретически может происходить рост, и его следует отличать от «периода» роста, который является периодом фактического роста (Carter, 1998). Существует несколько способов определения GSL. Одно из определений GSL — это период между датой последнего весеннего заморозка и первого осеннего заморозка (например, Robeson, 2002), где заморозки могут определяться пороговыми значениями минимальных суточных температур. В других исследованиях использовались пороговые значения температур за предопределенное количество дней для начала и окончания вегетационного периода, например, GSL можно определить как период между тем, когда дневные температуры >5 $^{\circ}\text{C}$ в течение >5 дней, и тем, когда дневные температуры <5 $^{\circ}\text{C}$ в течение >5 дней (Frich et al., 2002). Физиологическое значение этого периода, естественно, различается среди типов растений, но в высоких широтах можно предположить, что оно относится к многолетним растениям, которые подвергаются воздействию погоды в течение всего года, например, деревьям и кустарникам (Carter, 1998). В литературе существует большое разнообразие определений вегетационного периода, но было проведено лишь несколько сравнений между различными определениями на основе одного набора данных. Бринкманн (1979) сравнил по-разному определенные вегетационные периоды на четырех станциях в Висконсине, США, за 80-летний период, используя критерии заморозков, а также температуры, усредненные за несколько дней, в качестве определений вегетационного периода. Результаты показали, что в зависимости от определения для одной станции были получены различные тенденции, что означает, что тенденция в GSL чувствительна к конкретному используемому определению. Вальтер и Линдерхольм (2006) изучили ряд определений параметров вегетационного периода (начало, конец и продолжительность) из большой сети станций в районе Большого Балтии, и они также обнаружили большие различия в тенденциях GSL в зависимости от используемого определения. Исключение критерия мороза из определения может привести к ошибочному GSL, особенно в юго-западных частях исследуемой территории.

Следовательно, кажется, что для того, чтобы быть физиологически приемлемыми, следует использовать региональные определения GSL, так что нахождение единого всемирного определения маловероятно. Кроме того, определения GSL с использованием температур могут считаться действительными в областях, где вегетационный период в значительной степени ограничен температурой, но в более низких широтах необходимо учитывать другие факторы, такие как осадки и эвапотранспирация.

4.2. Вегетационный период в зависимости от сезонных температур

Ведин (1990) сравнил средний уровень температуры на самом севере Швеции за два 10-летних периода, из которых 1931–1940 годы были необычайно теплыми, а 1979–1988 годы — гораздо холоднее. К своему удивлению, он обнаружил, что средний GSL был несколько длиннее в период 1979–1988 гг., чем в более теплый период 1931–1940 гг. Он рассуждал, что это было связано с более теплыми веснами и осенью в последний период, но заявил, что в целом теплый период все еще может быть неблагоприятным по отношению к GSL. Джонс и Бриффа (1995) проанализировали среднесуточные температуры в течение вегетационного периода (здесь определяемые как дни >5 $^{\circ}\text{C}$) примерно с 200 станций в бывшем Советском Союзе. Они обнаружили, что за последние 110 лет произошло мало изменений в ряде переменных, связанных с вегетационным периодом. Среди других результатов они отметили, что существует небольшая корреляция между продолжительностью вегетационного периода и количеством градусо-дней (выше 5 $^{\circ}\text{C}$) в сезоне на уровне станции. Следовательно, более длительный вегетационный период автоматически не подразумевает увеличение количества более теплых дней. В более позднем исследовании Джонс и др. (2002) исследовали экстремальные температуры, надземный уровень моря и градусо-дни для четырех метеорологических записей, которые датируются восемнадцатым веком (Центральная Англия, Стокгольм, Уппсала и Санкт-Петербург).

Они обнаружили, что в северной Европе (Фенноскандия) вегетационные периоды были явно теплее до 1860 года, и только в конце 1930-х годов недавнего времени достигли более ранних уровней. Подобно российскому исследованию, они обнаружили, что продолжительность вегетационного периода лишь слабо коррелировала (r 0,2–0,4) с сезонными температурами (с мая по сентябрь) или числом градусо-дней, и поэтому более теплый вегетационный период не обязательно должен быть длиннее. Кроме того, GSL лучше коррелировал с годовыми температурами, чем с сезонными, во всех записях станций, и была сильная (отрицательная) связь между GSL и числом холодных дней в год.

4.3 Наблюдаемые изменения в термическом GSL

4.3.1. Европа

Картер (1998) проанализировал параметры (начало, конец, продолжительность и интенсивность) термического вегетационного периода за период 1890–1995 гг. на девяти участках в Северном регионе. Он обнаружил, что GSL значительно увеличился за последнее столетие, от 1 до 3 недель, но что удлинение было менее выраженным с 1960 года в большинстве районов. Абсолютная величина удлинения показала снижающуюся запад-восток

градиент между Данией и Финляндией и более высокая межгодовая изменчивость на западных участках. Более того, интенсивность (выраженная накопленными температурами, эффективной суммой температур выше 5 8C) увеличилась в региональном масштабе между 1890 и 1960 годами, но немного снизилась после 1960 года на всех участках, за исключением юго-западной Финляндии. [Линдерхольм и др. \(2006\)](#) исследовали термические тенденции вегетационного периода 20-го века в районе Большого Балтийского моря. Ежегодные даты начала, окончания и продолжительности вегетационного периода были рассчитаны для 49 станций в исследуемой области с использованием ежедневных измерений средней температуры. Анализ тенденций и тенденций компонентов вегетационного периода показал общее увеличение продолжительности вегетационного периода во всем регионе. В среднем за период 1951–2000 годов вегетационный период увеличился на 7,4 дня, причем наибольшее изменение произошло весной (на 6,3 дня раньше начала вегетационного периода). Наибольшее увеличение было обнаружено на станциях, прилегающих к Балтийскому морю и Скагерраку/Каттегатту, где датские станции показали увеличение GSL более чем на 20 дней в 20 веке. Кроме того, были изучены три длительных записи (начиная с 1850 года) из региона, показывающие высокую межгодовую и десятилетнюю изменчивость, гораздо более заметную, чем тенденции к увеличению. Однако были тенденции к увеличению частоты более длительных вегетационных периодов с 1950-х годов. [Менцель и др. \(2003\)](#) проанализировали климатологический вегетационный период в Германии, используя данные с 41 станции (1951–2000 гг.). Вегетационный период определялся пороговыми значениями единичных минимальных и средних суточных температур воздуха, и в течение этого 50-летнего периода они обнаружили удлинение вегетационного периода на 0,11–0,49 дней/год в зависимости от используемого определения. Наибольшее изменение было обнаружено в безморозный период из-за наблюдаемого более сильного увеличения минимальных суточных температур, а не максимальных. Аналогичные результаты увеличения безморозного периода были получены в Австрии, Швейцарии (обе по 0,5 дня/год) и Эстонии (0,36 дня/год). Кроме того, они отметили, что тенденция ослабевает на высокогорных станциях (>950 м над уровнем моря).

4.3.2. Северная Америка

В 1980-х годах [Скаггс и Бейкер \(1985\)](#) изучали колебания GSL между 1899 и 1982 годами в Миннесоте, США. Использовались данные о температуре с пяти сельских станций. Они обнаружили общее увеличение GSL, где три станции показали увеличение в среднем на 14 дней с 1899 по 1982 год. Увеличение GSL произошло из-за сочетания более ранних последних заморозков и более поздних первых заморозков. Однако на одной станции тенденция была противоположной, с уменьшением GSL. Модели

Межгодовые колебания продолжительности GSL были значительными среди станций, и был сделан вывод, что следует проявлять осторожность при экстраполяции результатов исследований GSL в пространстве и связывании их со средними колебаниями температуры. [Бутсма \(1994\)](#) исследовал долгосрочные (около 100 лет) тенденции для широкого спектра агроклиматических переменных с пяти станций по всей Канаде, чтобы определить, произошли ли значительные изменения в климатических параметрах, важных для сельского хозяйства. Он нашел доказательства потепления в течение вегетационного периода для станций в западной, но не в восточной Канаде. Потепление вегетационного периода сопровождалось более ранними датами последних весенних заморозков, более поздними датами первых осенних заморозков и более длительными безморозными периодами. Только данные с самой западной станции (Агассис) показали значительную положительную тенденцию в GSL: на других станциях GSL колебался вокруг долгосрочной нормы, хотя были тенденции к увеличению числа значений выше нормы за последние 60–20 лет. Не было никакой тенденции в GSL на самой восточной станции (Шарлоттаун). В штате Иллинойс, США, [Robeson \(2002\)](#) исследовал данные о температуре из Daily Historical Climate Network на предмет тенденций к более ранним весенним заморозкам в период 1906–1997 гг. Большинство из 36 станций показали тенденции к более ранним весенним заморозкам, однако в сети не было последовательной тенденции. Временные ряды показали большую межгодовую изменчивость, но результаты показали, что GSL стал примерно на 1 неделю длиннее в течение

4.3.3. Глобальный

Используя новый глобальный набор данных (ежедневные, гомогенизированные метеорологические записи из Австралийского климатического центра и Национального центра климатических данных), [Фрич и др. \(2002\)](#) наблюдали изменения климатических экстремальных явлений во второй половине 20-го века. Одним из наблюдаемых параметров был GSL, и они обнаружили значительное удлинение термического GSL во всех основных частях средних широт Северного полушария, сопровождающееся систематическим увеличением 90-го процентиля суточных минимальных температур и сокращением морозных, Однако исключения были обнаружены по всему Северному полушарию, особенно в Исландии (см. рис. 3 в работе [Frich et al., 2002](#)).

5. Краткая заметка об ограничениях и возможностях описанных методов.

Очевидно, что все представленные здесь методы расчета изменений GSL имеют свои унаследованные ограничения и возможности. Фенологические записи имеют преимущество предоставления информации о биологических фазах с высоким временным разрешением. В настоящее время,

Однако фенологические записи ограничены в своем пространственном распределении и не простираются далеко в прошлое.

Это затрудняет оценку изменений 20-го века в более долгосрочной перспективе. Поэтому недавнее внимание к разработке международных сетей наблюдений является обнадеживающим.

Спутниковые данные имеют преимущество в виде высокого пространственного покрытия, что позволяет проводить исследования региональных и глобальных исследований. Тем не менее, существуют некоторые проблемы, связанные с этим методом, например, временное разрешение, проблемы с отражательной способностью и калибровкой, а также короткие доступные записи. Также существует проблема, как соотнести усредненную по видам информацию из спутниковых наблюдений (на больших и потенциально разнообразных пространственных территориях) с фенологическими событиями. Использование климатологического вегетационного периода имеет преимущество в виде хорошего пространственного покрытия (по крайней мере, в некоторых частях мира) метеорологических станций. Кроме того, многочисленные записи охватывают 20-й век или более поздний период, что позволяет изучать долгосрочные изменения в изменчивости GSL и возможные механизмы, стоящие за этим (например, изменения в атмосферной циркуляции). Тем не менее, не существует универсального определения климатологического вегетационного периода, в основном из-за больших региональных (и локальных) различий в климате, и могут быть большие расхождения в изменении GSL в зависимости от используемого определения (Walther and Linderholm, 2006). Кроме того, климатологический вегетационный период определяется широко и может не отражать в действительности фактический биологический вегетационный период, особенно если используются только температуры.

В идеале, объединение трех обсуждаемых здесь методов дало бы лучшую информацию о временной и пространственной изменчивости GSL. Калибровка значений зелени NDVI с соответствующими фенологически полученными датами вегетационного периода для различных сезонных покровов земли облегчит исследования порогов зелени вегетационного периода в различных растительных сообществах и типах растительности (например, Chen et al., 2000). Это облегчит пространственную экстраполяцию фенологических точечных измерений с помощью спутниковых данных. Принятие во внимание климатологического аспекта необходимо при попытке определить возможные причины пространственных изменений GSL (например, почему противоположные тенденции в весенних фазах наблюдались в Западной и Восточной Европе (Ahas et al., 2002; Linderholm et al., 2006)) и выполнении временных экстраполяций фенологически полученных данных GSL.

6. Последствия изменения GSL

Прогнозируется, что изменение климата приведет к увеличению продолжительности вегетационного периода (например, IPCC, 2001; ACIA, 2004). Такое увеличение GSL, вместе с более теплым

Ожидается, что вегетационный период расширит возможности производства сельскохозяйственных культур в высоких северных широтах и увеличит потенциальное количество урожаев и, следовательно, сезонную урожайность многолетних кормовых культур (ACIA, 2004).

Однако в более теплых районах повышенное тепло в течение вегетационного периода может вызвать небольшое снижение урожайности, поскольку более высокие температуры ускоряют развитие, сокращая время накопления сухого вещества (ACIA, 2004). Эффекты в Фенноскандии могут заключаться в повышении линии произрастания деревьев и благоприятных условиях для выращивания более южных фруктов (Wielgolaski, 2003), а в альпийских районах с максимальным количеством осадков в течение вегетационного периода удлинение вегетационного периода в результате более высоких температур может привести к улучшению продуктивности лесов (Hasenauer et al., 1999).

Однако два недавних исследования показали, что недавнее потепление привело к негативным реакциям роста деревьев на участках линии произрастания деревьев на Аляске и в центральных Скандинавских горах (Linderholm and Linderholm, 2004; Wilmking et al., 2004). Следовательно, быстрое изменение климата, происходящее в течение следующих 100 лет, окажет большое влияние на уже живущие деревья, которые будут менее адаптивны к преобладающему климату. Кроме того, если виды деревьев по-разному реагируют на изменение климата, то конкурентные отношения между видами изменятся и, следовательно, в долгосрочной перспективе, видовой состав лесов и, возможно, географические ареалы видов (Kramer et al., 2000). Ускоренные темпы изменений, наблюдаемые в последние три десятилетия, указывают на то, что в ближайшем будущем мы увидим большие изменения в экосистемах; широтное/высотное расширение границ ареалов видов за счет создания новых локальных популяций и, следовательно, вымирание популяций низких широт/высот; растущее вторжение оппортунистических, сорных и/или высокоомобильных видов; прогрессирующее разделение взаимодействия видов (например, растений и опылителей) из-за несовпадающей по фазе фенологии (например, Hughes, 2000; Pen˜uelas and Filella, 2001). Однако экосистемы являются динамическими системами, которые со временем изменяются, даже при отсутствии вмешательства человека, и изменения в географическом ареале, размножении и размере популяции будут происходить даже при отсутствии изменения климата (McCarthy, 2001). Таким образом, для решения важных вопросов глобального моделирования, мониторинга экосистем и глобальных изменений необходимо расширить знания о взаимодействии атмосферы и биосферы, как в пространственном, так и во временном плане.

7. Заключительные замечания

Рассмотренные здесь исследования показывают, что вегетационный период характеризуется высокой межгодовой изменчивостью и что наиболее выраженные изменения в вегетационный период

параметры произошли в последние 30 лет 20-го века. Большинство фенологических исследований показывают, что значительное опережение весны, как следствие более теплых зим и весен и более ранних последних заморозков, было ответственно за большинство зарегистрированных изменений в вегетационный период. Фенологические наблюдения, NDVI со спутников и климатологические данные указывают на связь между недавно наблюдаемыми изменениями в природных системах и изменением климата 20-го века. Однако несколько авторов обнаружили сильные ассоциации между крупномасштабными погодными явлениями (например, NAO) и изменчивостью вегетационного периода, предполагая, что глобальное потепление может быть не единственным объяснением. Кроме того, другие факторы, такие как изменение землепользования, могли иметь значение. Следует иметь в виду, что наблюдаемые изменения в GSL не являются однородными; в то время как увеличение GSL наблюдалось в низких и средних широтах, GSL, по-видимому, уменьшается в некоторых местах высоких широт и высот. Многочисленные исследования показывают, что уже значительное воздействие на природные системы связано с изменением 20-го века. Повышение температуры на 1,4–5,8°C (в глобальном масштабе) в следующем столетии, несомненно, будет иметь серьезные последствия: некоторые виды получают выгоду от более теплого и продолжительного вегетационного периода, в то время как другие исчезнут.

Благодарности

Эта работа была поддержана Шведским исследовательским советом (VR) и проектом ЕС EMULATE (европейская и североатлантическая ежедневная многодекадная климатическая изменчивость), поддержанным Европейской комиссией в рамках Пятой рамочной программы, контракт № EVK2-CT-2002-00161 EMULATE. Автор выражает признательность за полезные комментарии, предоставленные двумя анонимными рецензентами и редактором доктором Джоном Стюартом.

Ссылки

- Абу-Асаб, М.С., Петерсон, П.М., Шелтер, С.Г., Орли, С.С., 2001. Более раннее цветение растений весной как реакция на глобальное потепление в районе Вашингтона, округ Колумбия. *Biodiv. Conserv.* 10, 597–612.
- АСΙΑ, 2004. Влияние потепления в Арктике: оценка воздействия на климат Арктики. Cambridge University Press, 140 стр.
- Ахас, Р., 1999. Долгосрочные фито-, орнито- и ихтиофенологические анализы временных рядов в Эстонии. *Int. J. Biometeorol.* 42, 119–123.
- Ахас Р., Ааса А., Мензель А., Федотова В.Г., Шайфингер Х., 2002. Изменения в европейской весенней фенологии. *Int. J. Climatol.* 22, 1727–1738.
- Ахас, А., Яагус, Й., Ахас, Р., Сепп, М., 2004. Влияние атмосферной циркуляции на фенологические фазы растений в Центральной и Восточной Европе. *Int. J. Climatol.* 24, 1551–1564.
- Badeck, F.-W., Bondeau, A., Böttcher, K., Doktor, D., Lucht, W., Schaber, J., Sitth, S., 2004. Реакции весенней фенологии на изменение климата. *New Phytologist* 162, 295–309.

Barford, CC, Wofsy, SC, Goulden, ML, Munger, JW, Pyle, EH, Ubranski, SP, Hutyr, L., Saleska, SR, Fitzjarrald, D., Moore, K., 2001. Факторы, контролирующие долгосрочную и краткосрочную секвестрацию атмосферного CO₂ в лесу средних широт. *Science* 294, 1688–1691.

Бобиен, Э.Г., Фриланд, Х.Дж., 2000. Тенденции весенней фенологии в Альберте, Канада: связь с температурой океана. *Int. J. Biometeorol.* 44, 53–59.

Beck, PSA, Karlsen, SR, Skidmore, A., Nielsen, L., Høgdal, KA, 2005. Начало вегетационного периода в северо-западной Европе, картографированное с использованием MODIS NDVI и откалиброванное с использованием фенологических наземных наблюдений. В: Труды 31-го Международного симпозиума по дистанционному зондированию окружающей среды — глобальный мониторинг для обеспечения устойчивости и безопасности, 20–24 июня, Санкт-Петербург, www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/welcome.html.

Bootsma, A., 1994. Долгосрочные (100 лет) климатические тенденции для сельского хозяйства в отдельных районах Канады. *Изменение климата* 26, 65–88.

Брэдли, Н. Л., Леопольд, А. С., Росс, Дж., Хаффакер, В., 1999. Фенологические изменения отражают изменение климата в Висконсине. В: Труды Национальной академии наук США, т. 96. стр. 9701–9704.

Бринкманн, ВАР, 1979. Продолжительность вегетационного периода как индикатор изменений климата в северо-западной Европе.

Картер, ТР, 1998. Изменения теплового вегетационного периода в странах Северной Европы за последнее столетие и перспективы на будущее.

Сельскохозяйственная наука о продуктах питания Финляндия 7, 161–179.

Кайан, Д.Р., Каммердинер, С.А., Деттингер, М.Д., Каприо, Дж.М., Петерсон, Д.Х., 2001. Изменения в наступлении весны на западе США. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 82, 399–415.

Чэнь, С., Тан, З., Шварц, М.Д., Сюй, Ч., 2000. Определение вегетационного периода наземной растительности на основе фенологии растений и спутниковых данных в Северном Китае. *Int. J. Biometeorol.* 44, 97–101.

Чэнь, С., Ху, Б., Ю, Р., 2005. Пространственные и временные изменения фенологического вегетационного периода и последствия изменения климата в умеренном восточном Китае. *Global Change Biol.* 11, 1118–1130.

Chmielewski, F.-M., Roßter, T., 2001. Реакция фенологии на изменение климата в Европе. *Agric. Forest Meteorol.* 108, 101–112.

Chmielewski, F.-M., Rotzer, T., 2002. Годовая и пространственная изменчивость начала вегетационного периода в Европе в связи с изменениями температуры воздуха. *Climate Res.* 19, 257–264.

Хмелевский, Ф.-М., Мюллер, А., Брунс, Э., 2004. Климатические изменения и тенденции в фенологии плодовых деревьев и полевых культур в Германии, 1961–2000. *Agric. Forest Meteorol.* 121, 69–78.

Коттон, ПА, 2003. Фенология миграции птиц и глобальное изменение климата. В: Труды Национальной академии наук США, т. 100. стр. 12219–12222.

Crick, HQR, Dudley, C., Glue, DE, Thomson, DL, 1998. Птицы Великобритании откладывают яйца раньше. *Nature* 388, 526.

Крик, HQR, Спаркс, ТН, 1999. Изменение климата, связанное с яйцами тенденции кладки. *Природа* 399, 423–424.

D'Odorico, P., Yoo, J.-C., Jaeger, S., 2002. Смена времён года: влияние североатлантического колебания? *J. Clim.* 15, 435–445.

ЕАОС 2004. Влияние изменения климата в Европе — оценка на основе индикаторов. Отчет Европейского агентства по окружающей среде № 2/2004. 107 стр.

Фиттер, АН, Фиттер, RSR, 2002. Быстрые изменения времени цветения у британских растений. *Science* 296, 1689–1691.

Форчхаммер, М.К., Пост, Э., Стенсет, Н.К., 1998. Фенология размножения и климат *Природа* 391, 29–30.

- Фрич, П., Александр, Л. В., Делла-Марта, П., Глисон, Б., Хейлок, М., Кляйн Танк, А. М. Г., Петерсон, Т., 2002. Наблюдаемые согласованные изменения в экстремальных климатических явлениях во второй половине 20-го века. *Climate Res.* 19, 193–212.
- Хазенауэр, Х., Немани, Р.Р., Шадауэр, К., Бег, С.В., 1999. Реакция роста лесов на изменение климата в период с 1961 по 1990 год в Австрии. *Forest Ecol. Manage.* 122, 209–219.
- Хо, Ч.-Х., Ли, Э.-Дж., Ли, И., Ким, В., 2006. Ранняя весна в Сеуле, Корея. *Международный журнал климатологии*, в печати.
- Hogda, KA, Karlén, SR, Solheim, I., 2001. Влияние изменения климата на вегетационный период в Финляндии, изученное с помощью временного ряда данных NOAA AVHRR NDVI. В: Труды IGARSS. 9–13 июля 2001 г., Сидней, Австралия ISBN 0-7803-7033-3.
- Хьюз, Л., 2000. Биологические последствия глобального потепления: сигнал уже очевиден? *Trend Ecol. Evol.* 15, 56–61.
- Hurrell, JW, 1995. Десятилетние тенденции в североатлантическом колебании: региональные температуры и осадки. *Science* 269, 676–679.
- Иноуэ, Д.В., Барр, Б., Армитидж, К.Б., Иноуэ, Б.Д., 2000. Изменение климата влияет на высотных мигрантов и зимующие виды. В: Труды Национальной академии наук США, т. 97. С. 1630–1633.
- МГЭИК, 2001. В: Хоутон Дж.Т., Динг Ю., Григгс Д.Д., Ноер М., ван дер Линден П.Дж., Дэй Х., Манселл К., Джонсон, Калифорния. (ред.), Изменение климата: научная основа. Вклад рабочей группы I в Третий оценочный доклад Международной группы экспертов по изменению климата. Cambridge University Press, Кембридж, Соединенное Королевство, стр. 881.
- Джонс, П.Д., Бриффа, К.Р., 1995. Температуры вегетационного периода на территории бывшего Советского Союза. *Int. J. Climatol.* 15, 943–959.
- Джонс, П.Д., Бриффа, К.Р., Осборн, Т.Дж., Моберг, А., Бергстром, Х., 2002. Связь между силой циркуляции и изменчивостью климата вегетационного периода и холодного сезона в северной и центральной Европе. *Голоцен* 12, 643–656.
- Кауфманн, Р.К., Д'Арриго, Р.Д., Ласковски, К., Минени, Р.Б., Чжоу, Л., Дави, Н.К., 2004. Влияние вегетационного периода и летней зелени на северные леса. *Geophys. Res. Lett.* 31, L09205, doi:10.1029/2004GL019608.
- Килинг, К.Д., Чин, Дж. Ф. С., Уорф, Т. П., 1996. Повышение активности северной растительности, выявленное на основе измерений атмосферного CO₂. *Nature* 382, 146–149.
- Козлов, М.В., Берлина, Н.Г., 2002. Сокращение продолжительности летнего сезона на Кольском полуострове, Россия. *Изменение климата* 54, 387–398.
- Краммер, К., Лейнонен, И., Луста, Д., 2000. Важность фенологии для оценки воздействия изменения климата на рост экосистем бореальных, умеренных и средиземноморских лесов: обзор. *Int. J. Biometeorol.* 44, 67–75.
- Линдерхольм, Х.В., 2002. Изменения роста сосны обыкновенной в двадцатом веке в центральных Скандинавских горах, связанные с климатом изменение. *Arctic Antarctic Alpine Res.* 34, 440–449.
- Линдерхольм, Х. В., Линдерхольм, К., 2004. Возрастная чувствительность *Pinus sylvestris* L. к климату в центральных Скандинавских горах. *Boreal Environ. Res.* 9, 307–317.
- Линдерхольм, Х. В., Вальтер, А., Чен, Д., Моберг, А., 2006. Тенденции двадцатого века в термическом вегетационном периоде в районе Большой Балтики. *Изменение климата*, в печати.
- Mantua, NJ, Hare, SR, Zhang, YJ, Wallace, M., Francis, RC, 1997. Междекадные колебания климата в Тихом океане с влиянием на производство лосося. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78, 1069–1079.
- Маккарти, Дж. П., 2001. Экологические последствия недавних изменений климата изменение. *Консерв. Биол.* 15, 320–331.
- Менцель, А., Фабиан, П., 1999. Вегетационный период в Европе увеличился. *Природа* 397, 659.
- Менцель, А., 2000. Тенденции фенологических фаз в Европе между 1951 и 1996 годами. *Int. J. Biometeorol.* 44, 76–81.
- Менцель, А., Эстрелла, Н., Фабиан, П., 2001. Пространственная и временная изменчивость фенологических сезонов в Германии с 1951 по 1996 год. *Global Change Biol.* 7, 657–666.
- Менцель, А., 2002. Фенология, ее значение для сообщества по глобальным изменениям. Редакционный комментарий. *Изменение климата* 54, 379–385.
- Менцель, А., 2003. Фенологические аномалии в Германии и их связь с температурой воздуха и NAO. *Изменение климата* 57, 243–263.
- Мензель А., Якоби Г., Ахас Р., Шайфингер Х., Эстрелла Н., 2003. Изменения климатологического вегетационного периода (1951–2000) в Германии по сравнению с другими странами. *Int. J. Climatol.* 23, 793–812.
- Менцель, А., Спаркс, Т. Х., Эстрелла, Н., Экхардт, С., 2005. Североатлантическое колебание «юго-юго-запад-северо-северо-восток» влияет на ход сезонов по всей Европе. *Global Change Biol.* 11, 909–918.
- Минени, Р.Б., Холл, Ф.Г., Селлерс, П.Дж., Маршак, А.Л., 1995. Интерпретация спектральных индексов растительности. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 33, 481–486.
- Минени, Р.К., Килинг, К.Д., Такер, К.Дж., Асрар, Г., Немани, Р.Р., 1997. Увеличение роста растений в северных высоких широтах с 1981 по 1991 год. *Природа* 386, 698–702.
- Мистеруд, А., Йоккоз, Н.Г., Стенсет, Северная Каролина, Лангватн, Р., 2000. Связь между соотношением полов, климатом и плотностью у благородных оленей: важность пространственного масштаба. *J. Anim. Ecol.* 69, 959–974.
- Пармезан, К., Йохе, Г., 2003. Глобально согласованный отпечаток последствий изменения климата в природных системах. *Nature* 421, 37–42.
- Пенуэлас, Дж., Филелла, И., 2001. Ответы на потепление в мире. *Наука* 294, 793–794.
- Pen˘uelas, J., Filella, I., Comas, P., 2002. Изменение жизненных циклов растений и животных с 1952 по 2000 год в Средиземноморском регионе. *Global Change Biol.* 8, 531–544.
- Пост, Э., Стенсет, Северная Каролина, 1999. Климатическая изменчивость, фенология растений и северные копытные. *Экология* 80, 1322–1339.
- Робсон, СМ, 2002. Увеличение продолжительности вегетационного периода в Иллинойсе в 20 веке. *Изменение климата* 52, 219–238.
- Роджерс, Дж. К., 1990. Закономерности низкочастотной ежемесячной изменчивости давления на уровне моря (1899–1986) и связанные с ней частоты волновых циклонов. *J. Clim.* 3, 1364–1379.
- Рут, Т.Л., Прайс, Дж.Т., Холл, К.Р., Шнайдер, С.Х., Розенцвейг, К., Паундс, Дж.А., 2003. Следы глобального потепления на диких животных и растениях. *Nature* 421, 57–60.
- Шайфингер Х., Мензель А., Кох Э., Питер К., Ахас Р., 2002. Атмосферные механизмы, управляющие пространственной и временной изменчивостью фенологических фаз в Центральной Европе. *Int. J. Climatol.* 22, 1739–1755.
- Шварц, МД, 1998. Фенология зеленой волны. *Nature* 394, 839–840.
- Шварц, МД, 1999. Продвижение к полному цветению. Планирование фенологических исследований для 21-го века. *Int. J. Biometeorol.* 42, 113–118.
- Шварц, МД, Чен, Х., 2002. Изучение наступления весны в Китае. *Климатическая резолюция* 21, 157–164.
- Скаггс, Р. Х., Бейкер, Д. Г., 1985. Колебания продолжительности вегетационного периода в Миннесоте. *Изменение климата* 7, 403–414.
- Solberg, B.Ø., Hofgaard, A., Huttelborn, N., 2002. Изменения в реакциях радиального роста прибрежной *Picea abies*, вызванные изменением климата в 20 веке, Центральная Норвегия. *Ecoscience* 9, 79–88.

- Спано, Д., Чезараччо, К., Дуче, П., Снайдер, Р.Л., 1999. Фенологические стадии природных видов и их использование в качестве климатических индикаторов. *Int. J. Biometeorol.* 42, 124–133.
- Спарк, Т. Х., Кэри, П. Д., 1995. Реакция видов на климат на протяжении двух столетий: анализ фенологических данных Маршама, 1736–1947. *J. Ecol.* 83, 321–329.
- Спарк, Т. Х., Менцель, А., 2002. Наблюдаемые изменения в сезонах: обзор. *Int. J. Climatol.* 22, 1715–1725.
- Спарк, Т. Х., Крокстон, П. Дж., Коллинсон, Н., Тейлор, П. В., 2005. Примеры фенологических изменений в прошлом и настоящем в сельском хозяйстве Великобритании. *Ann. Appl. Biol.* 146, 531–537.
- Стенсет, Н.С., Мистеруд, А., Оттерсен, Г., Харрелл, Дж. У., Чан, К.-С., Лима, М., 2002. Экологические эффекты колебаний климата. *Science* 297, 1292–1296.
- Stoˆkli, R., Vidale, P.L., 2004. Европейская фенология растений и климат, отраженные в 20-летнем наборе данных AVHRR о параметрах поверхности суши. *Int. J. Дистанционные датчики* 25, 3303–3330.
- Томпсон, Д.У. Дж., Уоллес, Дж. М., 1998. Характер арктических колебаний в зимних полях геопотенциальной высоты и температуры. *Geophys. Res. Lett.* 25, 1297–1300.
- Такер, К. Дж., Слейбэк, Д. А., Пинзон, Дж. Э., Лос, С. О., Минени, Р. Б., Тейлор, М. Г., 2001. Нормализованная разница индекса растительности в более высоких северных широтах и тенденции вегетационного периода с 1982 по 1999 гг. *Int. J. Biometeorol.* 45, 184–190.
- Ван Влит, А., Де Гроот, Р., Белленс, Ю., Браун, П., Брюггер, Р., Брунс, Э., Клеверс, Дж., Эстрегиль, К., Флексиг, М., Жаннере, Дж., Магги М., Мартенс П., Менне Б., Мензель А., Спарк Т., 2003. Европейская фенологическая сеть. *Int. J. Biometeorol.* 47, 202–212.
- Ведин, Х., 1990. Частота редких погодных явлений в периоды экстремального климата. *Geografiska Annaler* 72 A, 151–155.
- Вальтер, А., Линдерхольм, Х. В., 2006. Сравнение индексов вегетационного периода для Большого Балтийского региона. *Int. J. Biometeorol.*, представлено для публикации.
- Вальтер, Г. Р., Пост, Э., Конвей, П., Мензель, А., Пармезан, К., Биби, Т. Д. К., Фроментин, Дж. М., Хоег-Гульдберг, О., Бэйрлейн, Ф., 2002. Экологические реакции на недавние изменения климата. *Природа* 416, 389–395.
- Ван, К., Тенхунен, Дж. Д., 2004. Картографирование растительности с использованием многовременного NDVI на трансекте северо-восточного Китая (NECT). *Int. J. Прикладное наблюдение Земли. Геоинформ.* 6, 17–31.
- Вейхенмейер, Г. А., Блекнер, Т., Петтерссон, К., 1999. Изменения весеннего выброса планктона, связанные с североатлантическим колебанием. *Limnol. Oceanogr.* 44, 1788–1792.
- Уайт, М. А., Раннинг, С. В., Торнтон, П. Е., 1999. Влияние изменчивости продолжительности вегетационного периода на усвоение углерода и эвапотранспирацию за 88 лет в лиственных лесах восточной части США. *Int. J. Biometeorol.* 42, 139–145.
- Виелголаски, Ф.-Э., 1999. Начальные даты и основные температуры в фенологических наблюдениях за растениями. *Int. J. Biometeorol.* 42, 158–168.
- Виелголаски, Ф.-Э., 2003. Климатические факторы, определяющие фенологические фазы растений вдоль норвежского фьорда. *Int. J. Biometeorol.* 47, 213–220.
- Уилкинг, М., Джудей, Г. П., Барбер, В. А., Залд, Х. С. Дж., 2004. Недавнее потепление климата приводит к изменению реакции роста белой ели на границе леса на Аляске через температурные пороги. *Глобальные изменения биологии.* 10, 1736–1742.
- Вулф, Д. В., Шварц, М. Д., Лаксо, А. Н., Оцуки, И., Пул, Р. М., Шаулис, Нью-Джерси, 2005. Изменение климата и сдвиги в фенологии трех садовых древесных многолетников на северо-востоке США. *Int. J. Биометеорол.* 49, 303–309.
- Чжан, Х., Фридл, М. А., Шааф, С. В., Стралер, А. Н., Ходжес, Дж. Ф., Гао, Ф., Рид, Б. С., Хьюте, А., 2003. Мониторинг фенологии растительности с использованием MODIS. *Remote Sens. Environ.* 84, 471–475.
- Чжэн, Дж., Ге, Ц., Хао, Ц., 2002. Влияние потепления климата на фенофазы растений в Китае за последние 40 лет. *Chin. Sci. Bull.* 47, 1826–1831.
- Чжоу, Л., Такер, К. Дж., Кауфманн, Р. К., Слейбэк, Д., Шабанов, Н. В., Минени, Р. Б., 2001. Изменения активности северной растительности, выявленные на основе спутниковых данных индекса растительности в период 1981–1999 гг. *J. Geophys. Res.* 106, 20069–20083.