

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ЮЖНОГО УРАЛА ПРИ РАЗНЫХ СЦЕНАРИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА

Изучение ответной реакции природных экосистем суши и экологических комплексов, на изменение климата методами мониторинга и моделирования.

Ключевые слова: экосистема, фенологические модели, методы, параметры.

Воздействующие на экосистемы изменения климата и их последствия многообразны. Помимо изменений климата многие экосистемы подвергаются воздействиям иного характера, например, загрязнению природной среды и другим нагрузкам хозяйственного использования, таким как трансформация или уничтожение местообитаний, чрезмерная эксплуатация, биотические инвазии и преднамеренная интродукция чужеродных видов, антропогенное распространение патогенных организмов.

Оценить эффективность методики фенологических наблюдений и максимально их унифицировать [1].

Рассмотрим изменения сроков некоторых фенологических событий у ряда видов древесных растений на европейской части России. Оценка тренда проводилась методом линейной регрессии, т. е. находилась линейная функция времени

$$d^*(t) = At + B \quad (1)$$

которая наилучшим образом аппроксимирует временной ряд $\{d^*(t)\}$. Здесь $d^*(t)$ – дата (сутки в календарном году) сезонного явления в t -й год ($t = 1$ в первый год наблюдений). Коэффициенты A и B находятся методом наименьших квадратов.

Значения разности $d^*(t) - d^*(1)$ (с соответствующим знаком) между расчетными сроками в последний t -й и первый годы наблюдений принимались за оценку изменения за период времени от первого года до t -го и наносились на картосхемы по отдельным пунктам. Интерполяция данных между точками осуществлялась визуально. Изолинии оценок проводились с учетом значений в точках и расстояний между ними.

Поля изолиний близки, что свидетельствует об общем факторе, формирующем эти тенденции. Широкий пространственный масштаб этих, в основном однонаправленных, изменений свидетельствует о том, что их причина – кли-

матическое изменение условий весенних месяцев в сторону потепления.

Статистика также свидетельствует о наличии тесной связи. Во многих случаях по ряду среднесуточных значений температуры приземного воздуха удается расчетным методом получить, дату распускания первых у древесного растения, которая близка к фактической наблюдаемой дате.

Связь изменения климата с изменениями фенологических сроков у животных значительно более проблематична. Часто орнитологи пытаются соотнести сроки прилета птиц весной с условиями погоды того места, куда они прилетают [2].

Если решается задача оценки изменения сроков фенологических событий в ответ на изменение климата в ситуации, когда данные фенологических наблюдений отсутствуют или их недостаточно, а также когда речь идет о фенологических изменениях в ответ на ожидаемые в будущем изменения климата, то употребляются теоретические, расчетные методы.

Для расчета фенологических сроков древесных растений используется, в частности, один из прикладных климатических индексов – сумма эффективных температур SE . По определению, это сумма превышений средне суточными значениями температуры заданного порогового значения T_{th} за период времени от начала календарного года до суток j_0 (номер суток в календарном году)

$$SE(j_0, T_{th}) = \left(\sum_{\substack{j=1; \\ T_j \geq T_{th}}}^{j_0} (T_j - T_{th}) \right) \quad (2)$$

сутки j_0 , когда сумма $SE(j_0, T_{th})$ превысила значение $S_0 = 55^\circ C$ сут. при $T_{th} = 5^\circ C$, есть расчетная дата начала зеленения у березы [3].

При оценке влияния изменения климата на потоки CO_2 в лесных эко-системах основными задачами исследований являются:

- выявление составляющих углеродного баланса при современном климате и их изменений за последние 100–150 лет;
- оценка чувствительности составляющих углеродного баланса к изменению условий среды;
- сравнение разных методов оценки обмена CO_2 между экосистемами и средой и продуктивности экосистем;
- развитие модельных подходов для прогноза изменений углеродного баланса при изменении условий окружающей среды.

Для нахождения составляющих углеродного баланса в настоящее время используются микрометеорологические методы (метод вихревой ковариации), камерные методы, методы дистанционного зондирования, полумпирические расчетные и информационно-аналитические методы, имитационные модели процессов.

В то время как первые три метода – основа для получения эмпирических данных, расчетные методы используются для теоретической оценки составляющих углеродного баланса за пределами возможностей прямых измерений. Микрометеорологические и камерные методы определяют составляющие углеродного баланса только в масштабе экосистемы, в локальном масштабе, а дистанционные, модельные и информационно-аналитические позволяют проводить оценки в любых масштабах.

Баланс CO_2 в экосистеме описывается уравнением сохранения массы

$$NEE = GPP - R_e \quad (3)$$

где GPP – первичная брутто-продуктивность растительности;

R_e – полное дыхание экосистемы.

Размерность этих величин составляет [масса · площадь⁻¹ · время⁻¹]. Их разность, NEE (Net Ecosystem Exchange), определяет баланс между поглощением CO_2 растениями при фотосинтезе и выделением CO_2 растениями и почвой в процессе дыхания. Она равна нетто-потоку CO_2 между атмосферой и земной поверхностью. При этом предполагается, что горизонтальный обмен углеродом пренебрежимо мал. В свою очередь, дыхание экосистемы R_e подразделяется на автотрофное (дыхание растительности) R_a и гетеротрофное (дыхание почвы – почвенных мик-

роорганизмов и животных, а также разложение растительных остатков (дебриса) R_h

$$R_e = R_a + R_h \quad (4)$$

По определению, нетто-продуктивность растительности есть

$$NPP = GPP - R_a \quad (5)$$

Это дает связь NEE и NPP (при условии, что отсутствует горизонтальный обмен углеродом, в частности вынос растворенного углерода из экосистемы с поверхностным и подземным стоком)

$$NEE = NPP - R_h \quad (6)$$

Локальные потоки, описанные выше, обычно измеряются в [$гC \cdot м^{-2} \cdot год^{-1}$]. Для получения региональных оценок надо умножить удельную величину на площадь соответствующей территории. Региональные потоки обычно измеряются в [$ГтC \cdot год^{-1}$] ($1 Гт = 10^{15}$ г). По этой причине приводимые ниже результаты для биомного, регионального или глобального уровня, если возможно, сопровождаются указанием площади, для которой выполнялась оценка.

Заметим, что операция умножения на площадь дает для рассматриваемой территории величины NPP и GPP, но не величину нетто потока CO_2 , так как на территории действуют факторы, не учитываемые при локальных измерениях, среди которых основные – потери углерода из-за пожаров, насекомых-филлофагов и рубок леса [4].

В этом случае нетто-поток CO_2 , или чистая биомная продукция NBP (Net Biome Production), находится по формуле

$$NBP = NPP - R_h - D \quad (7)$$

где D – потери углерода от названных выше нелокальных факторов. Предлагаемый ниже обзор не касается потоков CO_2 в результате оттаивания многолетнемерзлых почв и болот [5].

Метод вихревой ковариации является уникальным методом, позволяющим проводить прямые измерения потоков явного тепла, водяного пара и атмосферных газов между земной поверхностью и атмосферой [6].

Метод основан на предположении, что вертикальный перенос упомянутых величин в атмосферном пограничном слое осуществляется посредством множества хаотично направленных турбулентных вихрей разных размеров. Значение потока некоторой субстанции С, например, CO_2 , находится интегрированием уравнения сохранения массы по объему с учетом осреднения Рейнольдса для С и скорости ветра

$$C(t) = \bar{C} + C' \quad (8)$$

$$w(t) = \bar{w} + w' \quad (9)$$

При некоторых упрощающих предположениях вертикальный поток CO_2 равен ковариации F высокочастотных (обычно не менее 10 Гц) пульсаций вертикальной составляющей скорости ветра $w(t)$ и пульсаций концентрации CO_2 $C(t)$, измеряемых на некоторой высоте над растительностью за некоторый промежуток времени (как правило, за 30 мин)

$$F = cov[w \cdots C] \quad (10)$$

Основным условием проведения надежных измерений вертикальных потоков является наличие интенсивного турбулентного обмена в приземном слое воздуха. При небольшой скорости ветра и слабой турбулентности, часто наблюдаемой в ночное время, использование метода может привести к недооценке вертикальных потоков, связанной с принятыми в методе допущениями о пренебрежении адвективными и конвективными восходящими и нисходящими составляющими переноса в приземном слое воздуха. Для коррекции измеренных потоков при данных условиях обычно используются как данные измерений составляющих вертикальной и горизонтальной адвекции, так и разные расчетные методики, основанные на определении потоков CO_2 , как функции температуры растительного покрова и почвы или на интерполяции потоков, полученных при максимально сходных метеорологических условиях при наличии интенсивного турбулентного обмена в приземном слое воздуха и в периоды, максимально приближенные по времени к моменту измерений.

Аппаратура для измерений обычно включает трехмерный высокочастотный ультразвуковой анемометр, малоинерционный датчик температуры, быстродействующие инфракрасные анализаторы водяного пара и диоксида углерода открытого или закрытого типов. На выходе системы получают временные ряды высокочастотных пульсаций, которые используются для расчета потоков тепла, водяного пара и нетто-обмена CO_2 (NEE). При измерении суммарных экосистемных потоков датчики устанавливаются на метеорологической мачте на некоторой высоте над растительным покровом. При измерениях над лесом высота расположения датчика должна составлять как минимум половину высоты растительного по-

крова. Метод может быть использован для измерений вертикальных потоков внутри экосистемы, например, для определения потоков CO_2 внутри леса, в частности для определения вклада почвы и лесной подстилки в интегральные экосистемные потоки [7].

Центральной является гипотеза о пропорциональности средних значений GPP и NPP величине фотосинтетически активной радиации ФАР (Photosynthetically Active Radiation – PAR), поглощенной растительностью за некоторый промежуток времени (не менее суток)

$$GPP = g \varepsilon GPP_{GPP} \cdot PAR \quad (11)$$

$$NPP = g \varepsilon GPP_{NPP} \cdot PAR \quad (12)$$

где g – доля ФАР, поглощенная растительным покровом, а ε_{GPP} и ε_{NPP} – соответствующие значения эффективности использования ФАР фотосинтезом.

Величина поглощенной ФАР (обычно измеряется в $мкмоль \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$) принимается в виде эмпирической линейной или нелинейной функции от вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Значения индекса NDVI рассчитываются по спектральным коэффициентам отражения земной поверхности. Они получают, в частности, с помощью системы MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, установленной на некоторых спутниках Земли. Значения ε_{GPP} и ε_{NPP} обычно принимаются постоянными или описываются как эмпирические функции температуры и влажности воздуха [8].

В более сложных случаях добавляются упругость водяного пара D_a и влажность почвы W_{soil} ; ε_{GPP} и ε_{NPP}

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} f_T(T_a) \cdot f_D(D_a) \cdot f_W(W_{soil}) \quad (13)$$

Здесь ε_{max} – максимально возможные значения ε , а $f_T(T_a)$, $f_D(D_a)$, $f_W(W_{soil}) \leq 1$ – некоторые эмпирические функции [9]. Эта формула применима как для ε_{GPP} , так и для ε_{NPP} . Предположение о линейной зависимости среднесуточных GPP и NPP от ФАР справедливо не всегда. В частности оно не всегда корректно для тропических лесов, а также для смешанных и широколиственных лесов умеренных широт.

Сложность моделируемой системы (растительность + климат) неизбежно приводит к значительной степени неопределенности в результатах моделирования состояния растительности в конце XXI в. В обобщающей работе [10] пред-

принято систематическое рассмотрение текущего состояния дел в этой области. Для анализа взяты пять распространенных моделей растительности DGVM: HYBRID, LPJ, ORCHIDEE, SDGVM, TRIFFID. Для получения климата будущего применялась модель Hadley Centre General Circulation Model. При этом использовались четыре эмиссионных сценария МГЭИК (A1FI, A2, B1, B2) [10].

При одинаковом сценарии климата результаты различаются в зависимости от использованной модели даже для глобальных величин. Анализ обнаружил значительную неопределенность в прогнозируемых концентрациях CO_2 , связанную с неопределенностью реакции биосферы на изменение климата. Все модели предсказывают увеличение поглощения CO_2 биосферой при всех сценариях изменения климата. Как и следовало ожидать, при использовании разных моделей региональные различия для компонентов углеродного цикла гораздо больше, чем глобальные.

Различия между моделями касаются как точности описания расположения биомов, так и возможности учета влияния разных факторов. Никакая биоклиматическая модель не может непосредственно учесть влияния изменения концентрации CO_2 на расположение и параметры биома. Обсуждение ограниченности возможностей этого типа моделей можно найти в работе. Помимо способности имитировать текущее распределение растительности, сильным критерием при оценке качества моделей является возможность описания самого процесса изменения растительности. Все модели естественно предполагают неизменность используемых функциональных зависимостей. Здесь существуют некоторые трудности. Модельные эксперименты показали, что учет (неучет) зависимости фотосинтеза от

концентрации CO_2 существенно влияет на расположение всех ФТР. Однако следует различать два аспекта этой зависимости. С одной стороны, во всех DGVM концентрация CO_2 является входным параметром подмоделей фотосинтеза. Поэтому ее изменение прямо влияет на скорость ассимиляции. Но хорошо известно, что отмечаются долговременные адаптивные реакции фотосинтетического аппарата и устьичной проводимости на увеличение концентрации CO_2 , которые заметны по величине, трудно предсказуемы и являются существенным источником неопределенности прогнозов. Формально говоря, параметры подмоделей фотосинтеза должны зависеть от уровня CO_2 . В целом физические закономерности естественно полагать неизменными, но нужно быть готовым к соответствующей подстройке используемых зависимостей в биотической части системы при обнаружении долговременных адаптивных изменений.

Результаты применения моделей даже в пределах одного их типа трудно сравнивать, прежде всего, из-за разных систем классификации биомов.

Большинство имитационных моделей систематически не сопоставлялись с биоклиматическими (биогеографическими). Среди последних прогнозы площади, например, бореальных лесов существенно различаются: исследования предсказывают заметное увеличение их площади. Что касается неопределенности в модельных прогнозах состояния растительности на конец XXI в., то систематическое сравнение пяти глобальных моделей было сделано. Таким образом, можно сделать вывод, что и само распределение растительности, и связанные с ним ее параметры (например, углеродный баланс) заметно отличаются в зависимости от использованной модели.

15.05.2013

Список литературы:

1. Куприянова, М. К. Фенологические наблюдения во внеклассной краеведческой работе / М. К. Куприянова., Ю. И. Новоженев., З. Г. Щенникова / Учебное пособие для учителей биологии, географии, естествознания и природоведения средних школ, Екатеринбург, Банк культурной информации – 2000. С. 244.
2. Соколов, Л. В. Влияние глобального потепления климата на сроки миграции и гнездования воробьиных птиц в XX веке / Л. И. Соколов / зоологический журнал – т. 85, №3, 2006. С. 317 – 341.
3. Шигалев, А. А. Сезонное развитие природы Европейской части СССР / А.А. Шигалев., А.П. Шиманюк – Географгиз – 1949. С. 240.
4. Моисеев Б. Н. Оценка и картографирование составляющих углеродного и азотного балансов в основных биомех России / Б.Н. Моисеев., И.О. Алябина / Известия РАН, серия геогр., №5, 2007. С. 1 – 12.
5. Schuur, E. The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra, Nature / E. Schuur., J. Vogel., R. Crummer., H. Lee., J. Sickman., T. Osterkamp – vol. 459, No. 7246, 2009. pp. 556–559.
6. Garratt J. R. Limitations of the eddy correlation technique for the determination of turbulent fluxes near the surface, Boundary Layer Meteorology, J. Garratt – vol. 8, 1975. pp. 255–259.
7. Constantin, J. Carbon dioxide fluxes at the forest floor determined with the eddy correlation technique, Physics and Chemistry of the Earth / J. Constantin., K. Morgenstern., A. Ibrom., G. Gravenhorst – vol. 21, No. 5–6, 1996. pp. 415–419.

8. Xiao, J. Estimation of net ecosystem carbon exchange of the conterminous United States by combining MODIS and AmeriFlux data, *Agr. and Forest Meteorol* / J. Xiao., Q. Zhuang., D. Baldocchi., B. Law., A. Richardson., J. Chen – vol. 148, No. 11, 2008. pp. 1827–1847.
9. Xiao, X. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needle-leaf forest, *Remote Sensing and Environment* / X. Xiao., D. Hollinger., J. Aber., V. Goltz., E. Davidson – vol. 89, 2009. pp. 519–534.
10. Kullman, L. Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973–2005: implications for tree line theory and climate change ecology / L. Kullman L., *J. Ecology* – vol. 95, 2007. pp. 41–52.

Сведения об авторе:

Изотов Борис Алексеевич, доцент кафедры летательных аппаратов
Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент.
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, тел.: (3532) 752858, e-mail: baizotov@yandex.ru

UDC 574.577

Izotov B.A.

Orenburg state university, e-mail: baizotov@yandex.ru

POSSIBLE WAYS OF DEVELOPING THE ECOSYSTEM OF THE SOUTHERN URALS UNDER DIFFERENT SCENARIOS OF GLOBAL CLIMATE

Studying of response natural ecosystems land and ecological complexes, on change of a climate by methods of monitoring and modelling.

Key words: ecosystem, phenological models, methods, parameters.

Bibliography:

1. Kupriyanova, M.K. Phenological supervision in vneklassovoj to study of local lore work: the Manual for teachers biology, geography, natural sciences and natural study of high schools, Ekaterinburg, Bank of the cultural information / M. K. Kupriyanova., Y.I. Novozhenov, Z.G. ShChennikov – 2000. pp. 244.
2. Sokolov, L.V. Influence of global warming of a climate on terms of migration and nesting of sparrow birds in XX century, *zoological magazine.* / L.V. Sokolov – т. 85, №3, 2006. pp. 317-341.
3. Sigalev, A.A. Seasonal development of the nature of European part CCP / A.A. Љigalev, A. P., Љиманык – Географгиз, 1949. 240 p.
4. Moiseyev. Estimating the carbon balance of central Siberia using a landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and Dynamic Global Vegetation Models, *Global Change Biology* / Moiseyev – vol. 17. 2007. pp. 351-365.
5. Schuur, E. The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra, *Nature* / E. Schuur., J. Vogel., R. Crummer., H. Lee., J. Sickman., T. Osterkamp – vol. 459. 2009. No. 7246, pp. 556–559.
6. Garratt J. R. Limitations of the eddy correlation technique for the determination of turbulent fluxes near the surface, *Boundary Layer Meteorology*, J. Garratt – vol. 8. 1975. pp. 255–259.
7. Constantin, J. Carbon dioxide fluxes at the forest floor determined with the eddy correlation technique, *Physics and Chemistry of the Earth* / J. Constantin., K. Morgenstern., A. Ibrom., G. Gravenhorst – vol. 21. 1996. No. 5–6, pp. 415–419.
8. Xiao, J. Estimation of net ecosystem carbon exchange of the conterminous United States by combining MODIS and AmeriFlux data, *Agr. and Forest Meteorol* / J. Xiao., Q. Zhuang., D. Baldocchi., B. Law., A. Richardson., J. Chen – vol. 148. 2008. No. 11, pp. 1827–1847.
9. Xiao, X. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needle-leaf forest, *Remote Sensing and Environment* / X. Xiao., D. Hollinger., J. Aber., V. Goltz., E. Davidson – vol. 2009. 89, pp. 519–534.
10. Kullman, L. Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973–2005: implications for tree line theory and climate change ecology / L. Kullman L., *J. Ecology* – vol. 95. 2007. pp. 41–52.