

## ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНОГО БИОГЕОЦЕНОЗА В СВЯЗИ С ВОЗРАСТОМ

Сандлерский Роберт Борисович

*Москва, Учреждение Российской академии наук  
Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН*

При планировании или интенсификации лесного хозяйства помимо продуктивности необходимо также учитывать средообразующие и климаторегулирующие функции биogeоценозов, выражающиеся в интенсивности транспирации и масштабе изменения температуры. Оценить их на основе локальных наземных измерений практически невозможно. Анализ данных дистанционного зондирования на основе термодинамического подхода дает возможность осуществлять подобные оценки в широком диапазоне масштабов. Спутниковые мультиспектральные измерения отраженной солнечной радиации и теплового потока деятельной поверхности позволяют рассчитать термодинамические характеристики преобразования солнечной энергии биogeоценозом: приходящую и поглощенную радиацию; затраты энергии на производство биологической продукции, эвапотранспирацию; аккумуляцию энергии биogeоценозом; тепловое рассеяние энергии в среду, температуру деятельной поверхности. Локальные полевые измерения свойств биogeоценоза (состав древостоя, возраст, состав травяно-кустарникового яруса, сумма площадей сечений и т.д.) позволяют оценить зависимость термодинамических характеристик биogeоценоза от состава и возраста его древостоя (сукцессионной стадии), а использование трехмерной цифровой модели рельефа — оценить их зависимость от положения в рельефе [1]. Целью настоящего сообщения является демонстрация возможностей использования мультиспектральной дистанционной информации и термодинамического подхода для оценки основных параметров функционирования лесных биogeоценозов в зависимости от их свойств.

Для расчета термодинамических характеристик биogeоценозов использовалась многоканальная съемка Landsat TM и ETM+ с пространственным разрешением 28.5x28.5 м. Было обработано 5 сцен для вегетационного периода, выполненных в различные сроки: 27 апреля 2000 г, 3 мая 1990 г, 20 июня 2002 г, 3 июня 2007 г, 27 сентября 2000 г. Для каждой элементарной ячейки территории (пиксель) были рассчитаны следующие термодинамические характеристики: приходящая и отраженная солнечная энергия ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), поглощенная энергия ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), неравновесность преобразования солнечной энергии (энтропия Кульбака, nit), энтропии потока приходящей и отраженной энергии (nit), эксергия солнечной радиации ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) — затраты энергии на эвапотранспирацию, тепловой поток от деятельной поверхности ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), температура деятельной поверхности ( $^{\circ}\text{C}$ ), связанная энергия ( $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{nit}$ ) — переход поступающей энергии в тепловой поток и энтропию, приращение внутренней энергии ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) — аккумуляция энергии системой, индекс продуктивности (вегетационный индекс,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ). Термодинамические характеристики рассчитывались по методике, предложенной S.E. Jorgensen и Y.M. Svirezhev [2]. Для основных термодинамических переменных, по четырем сценам (кроме июня 2007), был рассчитан вневременной инвариант их варьирования и отклонения от него [3]. Прямые оценки зависимости термодинамических характеристик от класса возраста осуществлялись для июня 2007 года. Сукцессионные стадии состояния биogeоценоза выделялись на основе классификации территории по спектральным яркостям каналов Landsat. Были выделены стадии: леса с преобладанием хвойных (ель), с преобладанием лиственных, вывалы и вырубки, зарастающие луга и поля.

Исследование осуществлено для территории Центрально-Лесного заповедника и его охранной зоны (32°53' В.Д. 56°46' С.Ш., юг Валдайской возвышенности, Тверская область). Ландшафт заповедника представляет собой морено-грядовую возвышенность с темнохвойными неморальными и бореальными естественными лесами, в сочетании с лесными и верховыми болотами, ветровалами, вырубками, разновозрастными вторичными лесами и по большей части заброшенными полями и лугами. Территория заповедника, в силу большого разнообразия и ненарушенности, создает уникальную возможность для тестирования различных методик исследования лесных биogeоценозов. На территории заповедника выполнено более 1500 комплексных описаний растительности и почвы, которые позволяют охватить все разнообразие состояний биogeоценотического покрова. Определение возрастов сообществ было осуществлено для точек комплексных описаний по сумме

площадей сечений, средним высоте и диаметру, которые позволяют оценить бонитет и по таблицам хода роста возраст и запас стволовой древесины. Посредством регрессионного анализа всей выборки полевых описаний было получено уравнение, отражающее зависимость между высотой и диаметрами древостоя. По таблицам объемов стволов [4] был определен бонитет для основных лесообразующих пород заповедника — ель, береза, осина; по таблицам хода роста были построены регрессионные уравнения зависимости диаметра от высоты, по которым рассчитывался возраст. Далее для каждой точки рассчитывалась доля участия основных пород: расчет осуществлялся по доле суммы площадей сечений на гектар породы от их совместной суммы площадей сечений. Средний возраст для точки рассчитывался как сумма возрастов трех основных пород, каждый из которых умножался на долю его участия в древостое. Полевые описания были привязаны в географических координатах и совмещены с энергетическими характеристиками для последующего расчета средних значений характеристик для класса возраста.

Анализ инвариантности позволил выявить термодинамические характеристики с минимальным варьированием во времени, поддержание которых, можно определить как целевую функцию преобразования энергии для биогеоценозов исследуемой территории: это поглощенная энергия, эксергия и тепловой поток. Инвариантность индекса продуктивности существенно ниже. Максимальную его инвариантность поддерживают хвойные леса, где он просто мал, луга, где он максимален, и в минимальной степени формирующаяся растительность на вывалах. Установлено, что способность к поддержанию основных инвариантов образует закономерный ряд, повторяющий сукцессионный: «луга — вывалы — лиственные леса — хвойные леса». Расчет средних значений инвариантов для эксергии и температуры для обобщенных сукцессионных стадий позволил оценить масштаб различий температуры, и соответственно, оценить климаторегулирующую роль лесной растительности. Еловые леса в среднем за вегетационный период на 3°C холоднее лугов, на 1.5°C холоднее вывалов и вырубок, на 1°C холоднее лиственных лесов.

В табл. 1 приведено варьирование средних значений основных термодинамических характеристик для классов возраста древостоя с преобладанием ели (3 июня 2007 г.). Поглощенная радиация и затраты энергии на транспирацию (эксергия) увеличиваются до 120 лет, затем, после 140 уменьшаются с минимумом на 220, после чего незначительно возрастают на 240 годах. Температура деятельной поверхности и затраты энергии на тепловое рассеивание максимальны на 40 годах и уменьшаются, достигая минимума к 120 и 80 годам соответственно, на 140 годах наблюдается локальный максимум для обеих переменных. Минимальные температура и тепловое рассеивание наблюдаются на 220 годах, после чего, к 240 они незначительно возрастают.

Средние значения термодинамических характеристик для 3 июня 2007 г. по классам возраста древостоя с преобладанием ели

Возраст, лет (интервал)	Кол-во описаний	Поглощенная энергия, Вт/м <sup>2</sup>	Эксергия, Вт/м <sup>2</sup>	Связанная энергия, Вт/м <sup>2</sup> *nit	Приращение внутренней энергии, Вт/м <sup>2</sup>	Индекс продуктивности Вт/м <sup>2</sup>	Температура, °С
1-20	20	985.80	752.92	10.49	222.39	53.03	13.27
21-40	21	996.98	769.49	10.85	216.65	43.61	13.43
41-60	43	998.12	774.14	10.72	213.26	44.51	13.20
61-80	78	1000.21	778.80	10.61	210.80	44.02	12.81
81-100	94	1002.64	783.29	10.65	208.71	42.24	12.73
101-120	134	1006.90	790.36	10.75	205.79	38.89	12.66
121-140	101	1007.02	789.71	10.81	206.50	38.46	12.80
141-160	43	1005.26	786.97	10.73	207.56	39.95	12.59
161-180	41	1004.79	786.67	10.72	207.40	40.61	12.75
181-200	26	1004.10	785.32	10.70	208.09	41.09	12.68
201-220	12	1001.24	782.71	10.52	208.01	44.56	12.59
В целом	613	1003.29	783.78	10.71	208.80	41.40	12.80

Приращение внутренней энергии и индекс продуктивности имеют в целом схожую динамику: абсолютный максимум их наблюдается на 20 годах, далее следует их уменьшение с минимумом на 120-140 годах, при этом для индекса продуктивности наблюдается небольшое относительное увеличение на 80 годах. Со 140 лет наблюдаются возрастание аккумуляции энергии в биогеоценозе и

увеличение продуктивности с локальным максимумом для последней в 220 лет. Таким образом, можно выделить несколько основных этапов в развитии лесного биогеоценоза: в период активного роста, с возрастом древостоя до 40 лет, для биогеоценоза характерно, в целом, высокая аккумуляция энергии и продуктивность и относительно низкая эвапотранспирация. С 40 до 120-140 лет биогеоценозы увеличивают эвапотранспирацию и уменьшают продуктивность, аккумуляцию энергии и температуру. Со 140 до 220-240 лет биогеоценозы уменьшают эвапотранспирацию и увеличивают аккумуляцию энергии и продуктивность, что связано, видимо, с процессом распада и, сопровождающего его возобновления соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что представленная технология позволяет количественно оценить климаторегулирующую функцию и продуктивность лесных биогеоценозов, и их динамику в зависимости от сукцессионной стадии и возраста.

*Благодарности*

*Автор выражает признательность д.г.н., проф. ИПЭЭ РАН Ю.Г. Пузаченко за постановку проблемы. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 09-05-00292-а.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сандлерский Р.Б. Оценка биологической продуктивности южно-таежных ландшафтов по данным дистанционного зондирования // *Аэрокосмические методы и информационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве*. ГОУ ВПО МГУЛ, 2007 С.130-133
2. Jorgensen S.E., Svirezhev Y.M. *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*. Elsevier Ltd. The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford OX5 1GB UK, 2004. 369 p.
3. Сандлерский Р.Б., Пузаченко Ю.Г. Термодинамика биогеоценозов на основе дистанционной информации // *Журнал общей биологии*. 2009. Т. 70 № 2. С. 121-142.
4. *Лесотаксационный справочник* / Б.И. Грошев, С.Г. Сеницын, П.И. Мороз, И.П. Сеперович. М.: Лесная промышленность. 1980. 288 с.

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ЛЕСОВ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Синкевич Антон Евгеньевич

*Санкт-Петербург, филиал ФГУП Рослесинфорг Севзаплеспроект*

В соответствии со ст.90 Лесного кодекса РФ, летом 2008 года были произведены первые работы по государственной инвентаризации лесов Ленинградской области. Впервые они были осуществлены по условно единообразной для всей страны методике.

Суть методики, в самом общем виде, заключается в разграничении площади страны на лесные районы, где существуют одинаковые лесорастительные условия. Для этих районов в границах субъектов РФ рассчитывается и закладывается определенное количество постоянных пробных площадей постоянного радиуса. На пробных площадях определяется широкий набор лесотаксационных показателей. Необходимое для достоверной оценки таксационных показателей количество пробных площадей определяется по классической формуле:

$$n = \frac{t^2 * S^2}{v^2},$$

где  $t$  — критерий Стьюдента, или показатель достоверности;  $v$  — планируемая (заданная) точность определения среднего запаса в стране в кубм;  $S^2$  — дисперсия признака.

В качестве исследуемого признака, как интегральный показатель, был выбран запас.

Для снижения расчетного количества пробных площадей, а также для возможного в будущем выхода на формы учета лесного фонда, была осуществлена стратификация лесного фонда.

Пробная площадь представляет собой три окружности, на которых производится пересчет деревьев определенного диаметра. Кроме пересчета деревьев, на пробе производится измерение широчайшего набора таксационных и экологических показателей. Структура пробной площади показана на рис. 1.