

## ТЕРМОДИНАМИКА ЭКОТОННЫХ ЛАНДШАФТОВ

А. С. Рулев, О. В. Рулева, В. Г. Юферев, Г. А. Рулев

*Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения  
Российской академии наук, Россия*

*Поступила в редакцию 18 октября 2017 г.*

**Аннотация:** Статья посвящена обоснованию термодинамического подхода к исследованиям экотонных ландшафтов. Предложен способ картографирования экотонов. Концепция экотонов как пограничных переходных зон с нестабильным состоянием, обусловленным высоким градиентом изменения природной (физической) среды, играет важную роль в описании пространства, а их выделение в суббореальных ландшафтах позволит определить границы таких зон. Установлено изменение значения радиационного потока тепла по географической широте на суше для основных географических зон. Анализ графиков показал, что кривая функции радиационного потока тепла имеет точку перегиба, соответствующую максимуму первой производной, в момент перехода возрастающей в убывающую скорость процесса. Анализ производных позволяет установить границы и величину диапазонов, характеризующихся значимыми изменениями радиационного потока тепла по географической широте. Приводятся материалы о влиянии защитных лесных насаждений на энергетические параметры почв. Условием приближения экотонных ландшафтов к оптимуму является возрастание энтальпии, уменьшение потока энтропии в почве и кронах древостоев защитных лесных насаждений.

**Ключевые слова:** ландшафт, экотон, логистическая функция, энергетический баланс, энтропия, гумус, фитоценоз, листовая масса.

**Abstract:** The article is devoted to validation of thermodynamic approach to exploration of ecotonic landscapes. A map-making method of ecotons is proposed. Conception of ecotons as a border transitional area with unstable state, which is stipulated by high grade of changes in natural (physical) environment, plays a pivotal role in space description and their segregation in subboreal landscapes allows to define the borders of such zones. Changes in warming radiation flux value for the main geographic zones within the geographic latitude overland are also presented in the article. The schedules review shows, that the function curve of warming radiation flux contains a flex point which coincides with the maximum of the first derivative at the moment of rising transition into decreasing speed of the process. Analysis of the derivatives allows to set up borders and range value, characterized by significant changes of warming radiation flux within the geographic latitude. Data over influence of shelterbelt forests on energetic parameters of soil are also presented in the article. The necessary condition for optimum approach for ecotonic landscapes is the rise of enthalpy, decrease of entropy flux in soil and top of trees in timber stands of shelterbelt forests.

**Key words:** landscape, ecotone, logistic function, energy balance, entropy, humus, phytocenosis, leaf mass.

В ходе эволюции природопользования естественные ландшафты трансформируются в антропогенные. Познание ландшафта невозможно без знания его структуры, которую можно рассматривать в трех аспектах. Пространственный аспект – взаимное расположение составных частей ландшафта, функциональный аспект – внутренние системообразующие связи, временной аспект – упо-

рядоченность смены состояний ландшафта по времени. Эти три аспекта мы будем рассматривать, изучая «механизм» взаимосвязей в ландшафте и соотношение его частей, т.е. применяя функциональный, динамический и системный подходы [1].

В ландшафте различают две системы внутренних связей – вертикальные и горизонтальные (латеральные), причем межкомпонентные (вертикальные) связи как бы опосредованы через латеральную структуру ландшафта, через сопряжение вхо-

дящих в него элементарных геосистем, которые образуют катену.

Катенарный подход [2] предполагает закономерную смену друг другом ландшафтных единиц (фаций, урочищ, местностей), где происходит эволюция почв, сукцессия растительного покрова и животного населения [3]. Эти ландшафтные структуры приобретают каскадный характер, им присущи определенные устойчивые признаки, отражающие зависимость комплекса природных условий и процессов от географической широты.

Изучение механизма формирования ландшафтных границ привело к появлению новых терминов: переходная зона, географический экотон, ландшафтный экотон, триггерный ландшафт, гистерезисный пояс [5, 6].

Экотоны – переходные, граничные пространства [5, 10, 15, 17] между различными природными системами (экосистемами, ландшафтами), между природными и антропогенными системами, между различными средами (вода-суша) и между различными природными зонами оказались значительно менее исследованными. Вместе с тем, распространенность экотонов в природе огромна, а роль весьма существенна. Концепция экотонов, как пограничных переходных зон с нестабильным состоянием, обусловленным высоким градиентом изменения природной (физической) среды, играет важную роль в описании пространства, а их выделение в суббореальных ландшафтах позволит установить границы таких зон.

Однако, наряду с исследованием ландшафтов – экотонов как специфических переходных пространств различных рангов и масштабов, чрезвычайный интерес представляют исследования организации и функционального своеобразия особых лабильных систем на переходных территориях. Одной из важнейших характеристик переходных территорий оказывается повышенная флуктуационность, неустойчивость параметров абиотической среды.

Негативные процессы в переходных зонах в значительной степени обусловлены деградацией почв и почвенного покрова. Этот процесс характеризуется уменьшением  $DG$  (энергия Гиббса),  $DH$  (энтальпия), увеличением  $DS$  (энтропия), уменьшением надежности и долговечности. Наблюдается уменьшение биопродуктивности систем, плодородия почв, уменьшение КПД использования ФАР и антропогенно затраченной энергии на повышение урожая и на воспроизводство плодородия почв.

Установлено, что в процессе интенсивной деградации происходит увеличение инертности органической и минеральной части, уменьшение комплексобразующей, структурообразующей способности и биологической активности почв [9, 11].

Снижается информационная функция инертного гумуса, быстрее развивается почвоутомление. При этом происходит увеличение  $DS$ , уменьшение  $DG$  и  $DH$  органической и минеральной части, уменьшается буферная емкость к внешним воздействиям. Почва по различным показателям теряет свою естественную структурную организацию и по совокупности параметров все сильнее отличается от стандарта, находящегося в термодинамическом равновесии со средой.

Известен периодический закон [2] географической зональности, устанавливающий связь географических зон с радиационным балансом земной поверхности и радиационным индексом сухости, где отмечается, что внутри каждого широтного пояса существует соответствие границ природных зон определенным значениям радиационного индекса сухости  $IR = R/Lr$ , где  $R$  – радиационный поток тепла, ГДж/м<sup>2</sup>год,  $L$  – скрытая теплота испарения,  $r$  – годовые осадки.

В результате исследований особенностей пространственного распределения переходных природных зон был разработан и запатентован «Способ картографирования природных переходных зон (экотонов)», патент RU № 2507602 [7, 8]. Суть этого патента заключается в картографировании переходных зон (экотонов) разного пространственного уровня в суббореальных ландшафтах, включающем определение широты переходных зон на суше по радиационному потоку тепла и радиационному индексу сухости.

Для математического описания изменения значения радиационного потока тепла по географической широте удобнее пользоваться нормированными величинами. При этом максимальное и минимальное значение радиационного потока тепла на суше принимаются соответственно 1 и 0. За ноль нормированного широтного диапазона принята широта 90°, а за единицу широта 0° (экватор).

Установлено изменение значения радиационного потока тепла по географической широте на суше для основных географических зон (рис.), характер которого может быть описан логистической зависимостью:

$$R = \frac{2,81}{[1 + 0,72e^{4,25-8,51x}]} + 0,28, \quad (1)$$

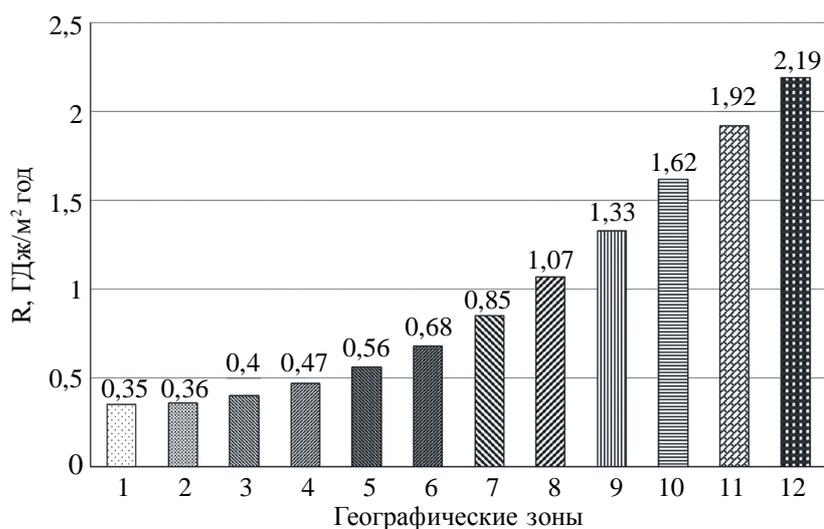


Рис. Изменение значения годового радиационного потока тепла на суше для основных географических зон

Условные обозначения: 1 – арктическая тундра; 2 – лишайниково-моховая тундра; 3 – кустарничково-кочкарная тундра; 4 – лесотундра; 5 – болотистые хвойные леса; 6 – хвойные леса; 7 – хвойно-широколиственные леса; 8 – лесостепь; 9 – ковыльно-разнотравная степь; 10 – ковыльно-типчаковая степь; 11 – полынно-злаковая полупустыня; 12 – пустыня

где 2,81 – коэффициент радиационного баланса, ГДж/м²год; 8,51 – коэффициент зональности; 0,28 – минимальный годовой радиационный поток тепла, ГДж/м²год.

Анализ показал, что кривая функции радиационного потока тепла имеет точку перегиба, соответствующую максимуму первой производной, в момент перехода возрастающей в убывающую скорость процесса (определяемого по первой производной  $R'(x)$ ).

Анализ производных позволяет установить границы и величину диапазонов по географической широте, характеризующихся значимыми изменениями радиационного потока тепла.

Первая производная  $R'(x)$  определяет скорость изменения радиационного потока тепла и имеет максимум, характеризующий ее переход от нарастания к убыванию, что позволяет установить широтный центр северной глобальной катены, который равен  $48,6^\circ$  с.ш.

Значения географической широты в точках экстремумов второй производной от  $34,2^\circ$  до  $62,1^\circ$  северной широты задают границы экотона глобальной катены (глобального экотона).

Вторая производная  $R''(x)$  характеризует ускорение процесса и в точке перегиба функции  $R(x)$  вторая производная равна нулю. Она достигает максимума и минимума в точках перегиба функ-

ции  $R'(x)$ . Значения широты в точках экстремумов соответствует границам зоны перехода.

Третья производная  $R'''(x)$ , а также последующие производные используются для выделения ландшафтных экотонов различного пространственного уровня, так как устанавливают географические координаты точек с параметрами, характеризующими изменения радиационного потока тепла на суше в плане переходов «возрастание – 0 – убывание». Анализ последующих производных дает возможность определить центры и границы локальных экотонов географических зон.

В результате, на основании уравнения радиационного баланса в логистической форме осуществляется выделение границ переходных зон с устойчивыми, малоустойчивыми и неустойчивыми экосистемами.

Таким образом, сформулировано правило Рулева-Юферева [10]: *Положение экотонов разного пространственного уровня в ландшафтах определяется производными уравнениями энергетического баланса географических зон, выраженного логистической функцией*

$$R = \frac{A}{[1 + 0,72e^{(4,25-Bx)}]} + C. \quad (2)$$

Суть правила заключается в определении связи границ переходных зон (экотонов) разного пространственного уровня с радиационным потоком

тепла на суше и радиационным индексом сухости, выделении внутри каждого широтного пояса границ природных зон определенным значениям радиационного индекса сухости, причем на суше связь радиационного потока тепла на суше – ( $R$ ) с нормированной географической широтой суббореального пояса – ( $x$ ) описывают уравнением энергетического баланса географических зон, выраженным вышеприведенной логистической функцией.

В переходных зонах ведется интенсивное агропроизводство, например, в лесостепи. Лесомелиоративная деятельность является одним из путей экологизации сельскохозяйственного производства. Основным технологическим фактором получения высоких урожаев сельскохозяйственной продукции являются комплексные мелиорации, с помощью которых формируется ландшафтная система с новой структурой и новыми функциональными свойствами. При разработке системы мероприятий природный ландшафт следует рассматривать как единую агрогеосистему, в которой функциональные связи между компонентами реализуются путем передачи вещественно-энергетических потоков.

Для решения проблемы оценки эффективности комплексных мелиораций предлагается использовать термодинамический подход, базирующийся на изучении направлений протекания неравновесных процессов и закономерностей энергетических превращений в природных системах. Природные объекты можно представлять как термодинамические системы в виде совокупности физических тел, которые могут взаимодействовать энергетически между собой с другими телами и обмениваться с ними веществом.

Согласно термодинамическим представлениям физико-химические процессы, происходящие в природных объектах, стремятся привести систему к равновесному состоянию, и это сопровождается ростом энтропии системы. Приток энергии в открытую термодинамическую систему, в которой присутствует биотическая составляющая, позволяет ей уменьшать свою энтропию.

Энтальпия, энтропия, эксэргия [4, 13, 14] – важнейшие обобщающие критерии термодинамической характеристики ландшафтов с определением физической и информационной энтропии.

Возникнув в недрах термодинамики при решении некоторой частной задачи, понятие энтропии стало расширяться с удивительной энергией, быстро перешагнуло границы физики и проникло в самые сокровенные области человеческой мысли.

Наряду с энтропией Клаузиуса появилась статистическая, информационная, математическая, лингвистическая интеллектуальная и другие энтропии. Энтропия стала базисным понятием теории информации и стала выступать как мера неопределенности некоторой ситуации. В каком-то смысле она – мера рассеяния, и в этом смысле она подобна дисперсии. Но если дисперсия является адекватной мерой рассеяния лишь для специальных распределений вероятностей случайных величин (например, нормального гауссова распределения), то энтропия не зависит от типа распределения. Популярность энтропии связана с ее важными свойствами: универсальностью и аддитивностью. Со своей стороны, информация оказалась характеристикой степени зависимости некоторых переменных. Ее можно сравнить с корреляцией, но если корреляция характеризует лишь линейную связь переменных, информация характеризует любую связь. Тип связи может быть каким угодно, и неизвестным исследователю.

Информацию можно рассматривать как отрицательную энтропию, тогда энтропия и информация смотрятся как понятия одного уровня. Однако это не так. В отличие от энтропии, информация – общенаучное понятие, приближающееся по своему значению к философской категории.

Есть ли связь между термодинамической энтропией Клаузиуса-Кельвина и статистической энтропией Больцмана-Планка? Вообще, может ли энтропия быть мерой хаоса [13, 14]?

$$dS = dS_i + dS_e, \quad (3)$$

где  $dS_i$  – изменение энтропии в ходе процессов, происходящих в самой живой системе;  $dS_e$  – изменение энтропии при обмене энергии с окружающей средой.

Согласно второму закону термодинамики величина  $dS_i$  может быть только положительной или в предельном случае равна нулю. Величина  $dS_e$  может быть положительной ( $dS_e > 0$ , система получает энтропию) и отрицательной ( $dS_e < 0$ , система не получает энтропию). При этом суммарное изменение энтропии может быть и отрицательным. При  $dS_e < 0$  и  $|dS_e| > |dS_i|$ :  $dS = dS_i + dS_e < 0$ , что означает увеличение упорядоченности в случае, когда систему покидает больше энтропии, чем возникает внутри ее в ходе обратимых процессов.

Рассмотрим производную энтропии по време-

ни  $\frac{dS}{dt}$ , которую называют скоростью изменения

или производством энтропии. Из выше изложенного для  $dS$  следует, что производство энтропии открытой системы:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_i}{dt} + \frac{dS_B}{dt}. \quad (4)$$

Для стационарного состояния, когда неравновесность во времени не изменяется, производство энтропии должно быть равно нулю (производная от постоянной величины), т.е. энтропия, возникающая в ходе процессов, происходящих внутри системы ( $dS_i$ ), должна полностью переходить во внешнюю среду.

Согласно теореме Пригожина [9], если открытую термодинамическую систему при неизменных во времени условиях предоставить самой себе, то прирост энтропии  $dS$  будет уменьшаться до тех пор, пока система не достигнет стационарного состояния динамического равновесия; в этом состоянии прирост энтропии будет минимальным. Таким образом, мы можем сказать, что для открытой системы в стационарном состоянии производство энтропии минимально.

В течение последних десятилетий подход к оценке устойчивости почв и ландшафтов, основанный на принципах термодинамики равновесных систем, получил широкое распространение.

Хорошо известно, что почва представляет собой открытую неравновесную полидисперсную подкомпонентную гетерофазную систему, непрерывно обменивающуюся веществом и энергией с другими компонентами биосферы. Существенная часть реакций, протекающих в почвах, относится к необратимым. Поэтому принципы и уравнения равновесной термодинамики и основанные на них математические модели используются в почвоведении преимущественно не для описания почвообразовательного процесса в целом, а для описания некоторых индивидуальных процессов и реакций, являющихся составными частями общего процесса почвообразования. Для ряда таких реакций и процессов в ограниченном пространстве почвенного профиля в течение определенных промежутков времени может устанавливаться устойчивое равновесие или квазиравновесное состояние в системе твердая фаза – раствор – газообразная фаза почвы. Равновесное или близкое к нему состояние достигается также в условиях многочисленных лабораторных опытов на почвенных образцах.

Основными преимуществами термодинамического подхода к изучению почвенных систем являются: 1) возможность надежно прогнозировать

направление самопроизвольного протекания той или иной реакции; 2) возможность оценивать устойчивость определенных минералов при данном составе почвенного раствора и газообразной фазы; 3) возможность рассчитывать активность и концентрацию компонентов в растворе в условиях равновесия при наличии в твердой фазе определенных труднорастворимых соединений.

Существенным препятствием в реализации термодинамического подхода является, помимо специфики почвы как открытой и в целом неравновесной природной системы, отсутствие надежных данных о термодинамических параметрах для многих почвенных компонентов.

Термодинамические характеристики для ряда компонентов почв могут существенно отличаться от справочных данных, относящихся преимущественно к чистым хорошо окристаллизованным соединениям. Это связано со значительной вариабельностью большинства минеральных, органических и органоминеральных почвенных компонентов по химическому составу, степени дисперсности и окристаллизованности. Для многих индивидуальных соединений в почвах, например, для гумусовых кислот, ряда смешанослойных глинистых минералов и многих органоминеральных соединений, точные данные об их химическом составе или весьма приблизительны, или вообще отсутствуют, соответственно для них нет и точных термодинамических характеристик.

При термодинамических расчетах необходимы сведения об активностях ионов в составе почвенного раствора, который существенно изменяется во времени и пространстве – в зависимости от влажности, размера пор, распространения корневых систем растений и колоний микроорганизмов и от многих других факторов. Поэтому получение репрезентативных проб почвенных растворов, особенно при низких влажностях почвы, само по себе представляет трудную задачу. Получение такой информации достаточно трудоемко и не всегда возможно в полном объеме.

Несмотря на указанные трудности и ограничения, термодинамические расчеты и основанные на них математические модели почвенно-химических реакций и процессов получают все большее развитие в почвоведении. При рассмотрении конкретных почвенных процессов во многих случаях имеет место совпадение экспериментальных данных с результатами, рассчитанными на основании термодинамических моделей. Такое совпадение с большей степенью достоверности подтверждают

адекватность выбора доминирующей реакции и правильность использованных значений термодинамических констант.

Исследования термодинамических характеристик почвенного покрова проводились в агроландшафтах юга Хоперско-Бузулукской равнины в экотоне между южными черноземами и темнокаштановыми почвами. Лесные полосы 40-летние, плотные, смешанного состава, высотой до 8-10 м.

Данные по этим объектам позволяют сделать вывод о том, что мощность гумусового горизонта почвы под лесными полосами в 1,1-1,5 раза выше, чем в адекватных местах открытой территории с максимумом влияния защитных лесных насаждений (ЗЛН), в основном на водораздельных элементарных геохимических ландшафтах (ЭГЛ). Дисперсионный анализ данных показал [13, 14], что на долю влияния положения ЭГЛ в катене приходится 40-70 % дисперсии, на долю влияния ЗЛН – 30-60 %.

Превышение средневзвешенного содержания гумуса в горизонте А+В<sub>1</sub> почвы под лесными полосами, по сравнению с приполосной зоной поля, достигает 1,1-1,2.

Гумусовая составляющая энергии твердой фазы намного (на два порядка) меньше, чем энергия, связанная с минеральной частью. Здесь представлены данные по энергетике почв с участием мощности гумусового горизонта. Считаем это оправданным, т.к. именно с гумусовым горизонтом в большей мере связано плодородие почвы, ее продуктивность, и на его мощность заметно оказывает влияние ЗЛН. Кстати, отсюда и разница в вели-

чинах энергии, аккумулированной в кристаллических решетках почвы на разных ЭГЛ. Что же касается влияния ЗЛН на элементы термодинамики почвы, то он сказывался, прежде всего, на гумусовой составляющей энтальпии. Гумусовая составляющая энтальпии в гумусовом горизонте под лесной полосой в 1,5-1,2 раза выше, чем в поле, с максимумом на водораздельном ЭГЛ (таблица). Что же касается удельной «гумусовой» энтальпии, то она лишь на 6-20 % выше под лесной полосой.

В настоящий момент актуальным направлением исследований является динамика энтропии ландшафтов в связи с изменениями климата.

В этом научном направлении особо стоит работа Л. Л. Голубятникова и Е. А. Денисенко [4] из института физики атмосферы РАН. Эти исследования носят прорывной характер.

Приведем материалы из этой работы. Отклик степных фитоценозов, занимающих около 400 тыс. км<sup>2</sup> территории Европейской России, на ожидаемое потепление климата будет различен. Для фитоценозов настоящей степи вероятно незначительное увеличение производства энтропии на 8-9 %, что свидетельствует о слабой изменчивости этих фитоценозов при ожидаемом потеплении. Исходя из сценария КМ ИФА РАН, получено понижение годового производства энтропии фитоценозами сухих степей до 11 %, в то время как по сценарию HadCM3 для этих фитоценозов ожидается повышение производства энтропии на 10 %. В лесостепных фитоценозах, произрастающих на площади около 220 тыс. км<sup>2</sup>, уменьшится ежегодное производство энтропии на 12-14 %. Этот факт

Таблица

Термодинамическая характеристика гумусовой составляющей прироста энергии в горизонте А+В<sub>1</sub> почвы под влиянием ЗЛН

ЭГЛ	$-\Delta H$	$dS=d_eS+d_iS$	$ d_iS  /  dS $
I			
Водораздельный	53	0,78=-0,18+0,96	0,23
Грансэлювиальный	33	0,79=-0,11+0,90	0,14
Трансаккумулятивный	31	0,82=-0,11+0,93	0,13
	20	1,07=-0,07+1,14	0,07
II			
Водораздельный	31	0,73=-0,11+0,84	0,15
Грансэлювиальный	24	0,63=-0,08+0,71	0,13
Трансаккумулятивный	27	0,69=-0,09+0,78	0,13
Супераккумулятивный	54	0,69=-0,18+0,87	0,26

Условные обозначения: I – территория с лесной полосой вдоль склона, II – территория с системой лесных полос поперек склона;  $\Delta H$  – прирост энергии, кал/г,  $dS$  – изменение энтропии, кал/г-град.,  $d_eS$  – внешний поток энтропии,  $d_iS$  – внутренняя энтропия.

указывает на то, что предстоящие изменения климатических параметров повлекут снижение интенсивности сукцессионного процесса в степных фитоценозах и изменение объема экологических ниш ряда видов степной растительности.

В полупустынных фитоценозах России, занимающих около 100 тыс. км<sup>2</sup> ее территории, согласно рассматриваемым сценариям климатических изменений будут происходить незначительные изменения. По сценарию ИФА РАН для этих фитоценозов получено понижение годового производства энтропии до 8 %, в то время как по сценарию HadCM3 возможно повышение этой величины до 12 %.

Ожидаемое потепление климата приведет к изменению пустынных фитоценозов, занимающих около 112 тыс. км<sup>2</sup> территории Европейской России. Годовое производство энтропии этими фитоценозами возрастет от 8 % (оценка по сценарию КМ ИФА РАН). Таким образом, ожидается, что в ряде пустынных фитоценозов изменятся их структурные характеристики, увеличится комплексность растительного покрова.

Ранее в работах Ю. М. Свирежева [17] показано, что годовое производство тепловой энергии растительным покровом равно его годовой общей биологической продукции, выраженной в энергетических единицах. Анализ зависимости между значениями годовых производств энтропии ( $S$ ) и тепловой энергии ( $Q$ ) растительным покровом Европейской России показал, что во второй половине XX века величина изменялась в пределах от 0,2 до 0,7 ГДж/(га · год).

Для территории Европейской России на основе термодинамического подхода проанализированы возможные изменения зональных фитоценозов при потеплении, соответствующем повышению среднегодовой глобальной температуры воздуха на 1°С согласно модели КМ ИФА РАН. Рассмотренная в данной работе величина годового производства энтропии растительного сообщества является комплексной, универсальной мерой, которая позволяет сравнивать фитоценозы с разным видовым составом.

Кроме того, очень важным научным направлением является оценка состояния и функционирования древостоев защитных лесных насаждений, которое может быть увязано с множеством метеофакторов, обуславливающих энергетику основного процесса фотосинтеза. Сложная комплексность может быть выражена одной термодинамической функцией – энтропией листовой системы.

Р. И. Флоров [12] в своей работе по определению энтропии в листовой системе древесных растений показал, как могут законы термодинамики объяснять сложные процессы. Для определения возникновения энтропии листовой системы он высказал следующее: отдельный лист вместе с окружающим воздухом образует две фазы одной системы «лист – воздух». Энтропия определяется лучистым теплообменом между листом и приземным слоем атмосферы, а возникновение энтропии в системе – тепловым потоком путем теплопроводности, конвекции и диффузии в системе «лист – воздух», т.е. теплообменом между листом и воздухом, включая транспирацию.

Изменение энтропии листа  $dS$  в ходе фотосинтеза представлено в виде изменения энтропии открытой системы:

$$dS = d_e S + d_i S, \quad (5)$$

где член  $d_e S$  описывает процессы поглощения листом световой энергии за вычетом неминуемых энергетических потерь; член  $d_i S$  – процессы тепловой диссипации, сопровождающие жизнедеятельность листа; член  $dS$  соответствует общему приросту биомассы растения вследствие фотосинтеза.

Уравнение энергетического баланса будет иметь следующий вид:

$$E_{\text{бм}} = (E_{\text{св}} - E') - E_i, \quad (6)$$

где  $E_{\text{бм}}$  – энергосодержание полученной биомассы растения;  $E_{\text{св}}$  – энергия поглощенного света;  $E'$  – энергетические потери, сопровождающие поглощение и фотосинтетическую ассимиляцию световой энергии;  $E_i$  – энергия тепловой диссипации метаболических процессов.

Поскольку определить скорость возникновения

энтропии  $\frac{d_i S}{dt}$  и тепловой диссипации  $\frac{dE_i}{dt}$  путем

измерения термодинамических сил и потоков непосредственно в самом листе невозможно, необходимо прибегнуть к каким-то косвенным методам. Основное допущение состоит в том, что все тепло, возникающее в листе в результате самопроизвольных метаболических реакций, отводится во внешнюю среду со скоростью, равной скорости об-

разования энтропии  $\frac{d_i S}{dt}$ . Основными процессами,

предназначенными для отвода тепла, являются, как известно, тепловое излучение и транспирация (испарение воды) листовой поверхностью. Скорость возникновения энтропии вследствие пе-

реноса тепла от единицы поверхности листа во внешнюю среду выразится согласно

$$\left(\frac{d_i S}{dt}\right) = p \frac{DT}{T^2}, \quad (7)$$

где  $p$  – тепловой поток «лист – воздух» (кал·см<sup>-2</sup> мин<sup>-1</sup>);  $T$  – средняя абсолютная температура «лист – воздух»;  $DT$  – разница температур между листом и воздухом.

Определение энергии тепловой диссипации ( $E_i$ ) метаболических процессов в системе «лист – воздух» в различных экспериментальных условиях показало, что она может быть использована для вычисления потенциальной продуктивности естественных лесных насаждений и коэффициента полезного действия фотосинтеза [16].

Таким образом, анализ радиационного потока тепла на суше позволяет установить границы и величину диапазонов переходных зон по географической широте, характеризующихся значимыми изменениями радиационного потока тепла, а снижение энтропии свидетельствует о выраженной почвомелиорирующей роли ЗЛН, причем степень этого снижения – о действенности лесомелиорации в цепи педосопреженных ЭГЛ. При этом если оценивать потоки энтропии под влиянием лишь биологической аккумуляции органического вещества, то можно видеть, что наибольшая эффективность лесомелиорации наблюдается на водораздельной территории. Здесь же наибольший удельный вес в общей энтропии внешней составляющей. Когда же процессы биологической аккумуляции вещества дополняются механической аккумуляцией (с расположением ЗЛН поперек склона) изменение энтропии, связанные с действием ЗЛН ( $d_i S$ ) на склоне, приближается к таковой на водораздельной территории, а в условиях супераквального ЭГЛ – даже ниже ее. Соответственно вырастает относительная эффективность лесомелиорации на подчиненных ЭГЛ ( $dS = 0,63-0,69$  против  $0,73$  на контроле). Условием приближения агроэко систем к оптимуму является возрастание энтальпии, уменьшение потока энтропии в почве и древостоях, а также при достижении высокой средневзвешенной продуктивности агроландшафтов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анопоченко Л. Ю. Учение о биосфере и ландшафтоведении / Л. Ю. Анопоченко, М. В. Якутин. – Новосибирск : Сибирский государственный университет геоэкологии и технологий, 2015. – 143 с.

2. Будыко М. И. Глобальная экология / М. И. Будыко. – Москва : Мысль, 1977. – 327 с.

3. Ганжара Н. Ф. Ландшафтоведение / Н. Ф. Ганжара, Б. А. Борисов, Р. Ф. Байбеков. – Москва : ИНФРА-М, 2015. – 240 с.

4. Голубятников Л. Л. Термодинамический подход к оценке влияния климатических изменений на растительный покров / Л. Л. Голубятников, Е. А. Денисенко // Журнал общей биологии. – 2010. – Т. 70, № 1. – С. 85-96.

5. Золотокрылин А. Н. Природная переходная зона на Прикаспийской низменности / А. Н. Золотокрылин, Т. Б. Титкова // Известия РАН. Сер. географическая. – 2004. – № 2. – С. 92-99.

6. Масютенко Н. Н. Система оценки ресурсного потенциала агроландшафтов / Н. Н. Масютенко. – Курск : ГНУ ВНИИЗ и ЗПЭ РАСХН, 2012. – 67 с.

7. Назаров А. Г. Термодинамическая направленность почвообразования в истории развития экосистем / А. Г. Назаров // Почвы, биогеохимические циклы и биосфера. – Москва : Товарищество научных изданий КМК, 2004. – С. 70-102.

8. Пат. № 2507602 Российская Федерация, МПК С1 G09В 29/00 (2006.01). Способ картографирования природных переходных зон (экотонов) / Рулев А. С. [и др.]. № 2012136002/12; заявл. 21.08.2012; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5.

9. Рубин А. Б. Термодинамика биологических процессов : учебное пособие / А. Б. Рубин. – 2-е изд. – Москва : Издательство Московского университета, 1984. – С. 148-154.

10. Рулев А. С. Аналитическое определение границ переходных природных зон (экотонов) / А. С. Рулев, В. Г. Юферев // Вестник Волгоградского государственного университета. Сер. 2, Естественные науки. – 2015. – № 1(1). – С. 69-74.

11. Сандлерский Р. Б. Многомерный анализ термодинамических переменных южно-таежных биогеоценозов по данным дистанционного зондирования / Р. Б. Сандлерский // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 1(5). – С. 1363-1366.

12. Флоров Р. И. Опыт применения скорости возникновения энтропии в листовой системе лесных древесных пород / Р. И. Флоров // Физиология растений. – 1966. – Т. 13, вып. 4. – С. 688-694.

13. Breda N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies / N. J. J. Breda // Journal of Experimental Botany. – 2003. – Vol. 54, № 392. – P. 2403-2417.

14. Jorgensen S. E. Towards a thermodynamic theory for ecological systems / S. E. Jorgensen, Yu. M. Svirezhev. – Amsterdam : Elsevier. – 366 p.

15. Land use impact evaluation in life cycle assessment based on ecosystem thermodynamics / T. Wagendorp [et. al] // Energy. – 2006. – Vol. 31. – P. 112-125.

16. Rant Z. Ecological production based pricing of biosphere processes. Special issue: The Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and

Ecological Perspectives / Z. Rant // Ecological Economics. – 1996. – № 41. – P. 457-478.

17. Svirezhev Yu. M. Thermodynamics and Ecology / Yu. M. Svirezhev // Ecological Modeling. – 2000. – Vol. 132. – P. 11-12.

#### REFERENCES

1. Anopchenko L. Yu. Uchenie o biosfere i landshaftovedenii / L. Yu. Anopchenko, M. V. Yakutin. – Novosibirsk : Sibirskiy gosudarstvennyy universitet geosistem i tekhnologiy, 2015. – 143 s.

2. Budyko M. I. Global'naya ekologiya / M. I. Budyko. – Moskva : Mysl', 1977. – 327 s.

3. Ganzhara N. F. Landshaftovedenie / N. F. Ganzhara, B. A. Borisov, R. F. Baybekov. – Moskva : INFRA-M, 2015. – 240 s.

4. Golubyatnikov L. L. Termodinamicheskiy podkhod k otsenke vliyaniya klimaticheskikh izmeneniy na rastitel'nyy pokrov / L. L. Golubyatnikov, E. A. Denisenko // Zhurnal obshchey biologii. – 2010. – T. 70, № 1. – S. 85-96.

5. Zolotokrylin A. N. Prirodnaya perekhodnaya zona na Prikaspiyskoy nizmennosti / A. N. Zolotokrylin, T. B. Titkova // Izvestiya RAN. Ser. geograficheskaya. – 2004. – № 2. – S. 92-99.

6. Masyutenko N. N. Sistema otsenki resursnogo potentsiala agrolandshaftov / N. N. Masyutenko. – Kursk : GNU VNIIZ i ZPE RASKhN, 2012. – 67 s.

7. Nazarov A. G. Termodinamicheskaya napravlenost' pochvoobrazovaniya v istorii razvitiya ekosistem / A. G. Nazarov // Pochvy, biogeokhimicheskie tsikly i biosfera. – Moskva : Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2004. – S. 70-102.

8. Pat. № 2507602 Rossiyskaya Federatsiya, MPK S1 G09V 29/00 (2006.01). Sposob kartografirovaniya prirodnykh perekhodnykh zon (ekotonov) / Rulev A. S. [i dr.].

№ 2012136002/12; zayavl. 21.08.2012; opubl. 20.02.2014, Byul. № 5.

9. Rubin A. B. Termodinamika biologicheskikh protsessov : uchebnoe posobie / A. B. Rubin. – 2-e izd. – Moskva : Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1984. – S. 148-154.

10. Rulev A. S. Analiticheskoe opredelenie granits perekhodnykh prirodnykh zon (ekotonov) / A. S. Rulev, V. G. Yuferev // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 2, Estestvennyye nauki. – 2015. – № 1(1). – S. 69-74.

11. Sandlerskiy R. B. Mnogomernyy analiz termodinamicheskikh peremennykh yuzhno-taehnykh biogeotsenozov po dannym distantsionnogo zondirovaniya / R. B. Sandlerskiy // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. – 2012. – T. 14, № 1(5). – S. 1363-1366.

12. Florov R. I. Opyt primeneniya skorosti vozniknoveniya entropii v listovoy sisteme lesnykh drevesnykh porod / R. I. Florov // Fiziologiya rasteniy. – 1966. – T. 13, vyp. 4. – S. 688-694.

13. Breda N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies / N. J. J. Breda // Journal of Experimental Botany. – 2003. – Vol. 54, № 392. – P. 2403-2417.

14. Jorgenzen S. E. Towards a thermodynamic theory for ecological systems / S. E. Jorgenzen, Yu. M. Svirezhev. – Amsterdam : Elsevier. – 366 p.

15. Land use impact evaluation in life cycle assessment based on ecosystem thermodynamics / T. Wagendorp [et. al] // Energy. – 2006. – Vol. 31. – P. 112-125.

16. Rant Z. Ecological production based pricing of biosphere processes. Special issue: The Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and Ecological Perspectives / Z. Rant // Ecological Economics. – 1996. – № 41. – P. 457-478.

17. Svirezhev Yu. M. Thermodynamics and Ecology / Yu. M. Svirezhev // Ecological Modeling. – 2000. – Vol. 132. – P. 11-12.

Рулев Александр Сергеевич

доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН), г. Волгоград, т. (8442)46-25-73, E-mail: [rulev54@rambler.ru](mailto:rulev54@rambler.ru)

Рулева Ольга Васильевна

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией изучения и прогнозирования биопродуктивности агролесоландшафтов Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН), г. Волгоград, т. (8442)46-25-67, E-mail: [bifu@mail.ru](mailto:bifu@mail.ru)

Rulev Alexander Sergeyevitch

Doctor of Agricultural Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific Work of the Federal State Budget Scientific Institution «Federal Scientific Centre for Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences», Volgograd, tel. (8442)46-25-73, E-mail: [rulev54@rambler.ru](mailto:rulev54@rambler.ru)

Ruleva Olga Vasil'yevna

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Scientific Officer, Head of the Laboratory for the Study and Forecasting of Bioproductivity of Agroforestry Landscapes of the Federal State Budget Scientific Institution «Federal Scientific Center for Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences», Volgograd, tel. (8442)46-25-67, E-mail: [bifu@mail.ru](mailto:bifu@mail.ru)

Юферев Валерий Григорьевич

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН), г. Волгоград, т. (8442)46-25-68, E-mail: [vyuferev1@rambler.ru](mailto:vyuferev1@rambler.ru)

Рулев Глеб Александрович

научный сотрудник лаборатории геоинформационного моделирования и картографирования агролесоландшафтов Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН), г. Волгоград, т. (8442)46-25-68, E-mail: [g.heroes@yandex.ru](mailto:g.heroes@yandex.ru)

Yuferev Valeriy Grigor'yevitch

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory of Geoinformation Modeling and Mapping of Agroforestry Landscapes of the Federal State Budget Scientific Institution «Federal Scientific Centre for Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences», Volgograd, tel. (8442)46-25-68, E-mail: [vyuferev1@rambler.ru](mailto:vyuferev1@rambler.ru)

Rulev Gleb Alexandrovitch

Researcher of the Laboratory of Geoinformation Modeling and Mapping of Agroforestry Landscapes of the Federal State Budget Scientific Institution «Federal Scientific Centre for Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences», Volgograd, tel. (8442)46-25-68, E-mail: [g.heroes@yandex.ru](mailto:g.heroes@yandex.ru)