

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ГЕОСИСТЕМ

**Ф. Н. Лисецкий,**

профессор Национального исследовательского университета «Белгородский государственный университет»,  
liset@bsu.edu.ru

**А. Г. Нарожная**

аспирант НИУ «БелГУ», narozhnyaya\_a@bsu.edu.ru

В статье показаны возможности использования энергетического подхода для определения потенциала геосистем и массоэнергообмена. Представлены карты распределения энергетических затрат на почвообразование и прироста первичной продукции растительности на территории Восточно-Европейской равнины. Даны оценки энергетика почвообразования, гумусонакопления для основных зональных биомов и термодинамические характеристики почвообразующих пород (энергия Гиббса и энтропия) на региональном уровне.

This paper shows the possibility of using the energy approach to determine the potential geosystems and Mass-energy exchange. The authors constructed maps of the energy costs of soil formation and growth of the primary production of vegetation in the East European Plain. This paper gives an estimate of energy soil, humus accumulation for the main zonal biomes and thermodynamic characteristics of the parent rocks (Gibbs energy and entropy) at the regional level.

**Ключевые слова:** энергия почвообразования, потенциальная годовичная продукция, гумус почв, энергетика почвообразующих пород.

**Keywords:** the energy of soil formation, the potential annual production, humus soil, energy-forming rocks.

**Введение.** Перспективность энергетического подхода к оценке массоэнергообмена в геосфере отражена во многих работах по оценке процессов, протекающих как в природных экосистемах [1, 2 и др.], так и в агроландшафтах [3, 4 и др.].

Согласно принципу геоэквивалентов, предложенному А. М. Алпатьевым [5], в природную среду необходимо вернуть превосходящее количество вещества и энергии по сравнению с изымаемым. Поэтому энергетическая оценка природной подсистемы должна позволить определить оптимальное значение антропогенной энергии для поддержания экологического равновесия с учетом изъятия фитомассы с урожаем и/или трансформации геосистем.

Сложная структурно-функциональная организация и ярко выраженная взаимообусловленность экологических функций биосферы, включающая зональные и интразональные экосистемы и природные зоны со всеми компонентами, прежде всего, почвами [6], определяет необходимость разработки интегративных подходов к исследованию биогеоценозов как саморегулирующихся энергетических систем и решению всего комплекса проблем по гармонизации взаимоотношения человека с биосферой.

Возникновение и развитие почв, как и других диссипативных структур, обусловлено тем, что поток энергии может упорядочивать системы, уменьшать их энтропию. Почва — это неравновесная, асимметричная система, которая находится в состоянии постоянного обмена с окружающей средой по веществом и энергией. Она является открытой системой, поскольку не может существовать без связи со средой, и в то же время она замкнута, как опосредствующая себя целостность. Имеющееся здесь противоречие — необходимый элемент развития [7]. Чтобы энергетический потенциал системы оставался на постоянно высоком уровне, а степень ее внутренней организации оставалась на постоянно низком энтропийном уровне, требуется пополнять запасы энергетически активных веществ за счет поступления лучистой энергии, энергии получаемой в процессе массообмена, изменения внутренней энергии системы, производимой системой работы.

Научное направление, сложившееся в рамках учения об экологии почв, — «энергетика почвообразования», получило развитие, начиная с работы В. Р. Волобуева 1958 г. [8]. В более поздней работе этого автора [9] при определении суммарных затрат энергии на почвообразование (Q) перечислены основные виды затрат в энергобалансе: энергия химического и физического разложения минералов почвообразующих пород; энергия, аккумулируемая в гумусе; энергия, расходуемая в биологических реакциях преобразования органических и минеральных веществ, энергия, расходуемая на испарение с поверхности почвы и растений; энергия, расходуемая в процессах транспирации; потери энергии в процессах механической миграции солей и мелкозема в почве; энергия, расходуемая в процессе теплообмена в системе почва—атмосфера.

В работе нами представлены и реализованы некоторые подходы к энергетической оценке природных компонентов основных зональных биомов.

**Материалы и методы.** Объектом исследования выбрана Восточно-Европейская (Русская) равнина в границах Российской Федерации.

В качестве инструментария использована программа ArcGIS, предоставляющая широкие возможности визуализации, картографирования и геоделирования.

Оценку энергии, участвующей в почвообразовании (величины Q), проводили по формуле, предложенной В. Р. Волобуевым [10], которая интегрально включает условия тепло- и влагообеспеченности в энергетическую оценку потенциала почвообразовательного процесса. При составлении карты распределения энергии почвообразования нами использованы данные по солнечной радиации и атмосферным осадкам 80 метеостанций, относительно равномерно распределенных по территории России и стран ближнего зарубежья. Наличие точек за пределами России позволило более достоверно отразить положение изолиний в пограничных территориях. Равномерность распределения метеостанций по территории оценивали с использованием сетки квадратов размером  $2,5 \times 2,5^\circ$ ,

обязательным условием распределения являлось наличие в ячейке одной метеостанции. Климатические данные были интерполированы в среде ArcGIS, а полученные grids были использованы для вычислений, каждая из ячеек при которых получала свое значение согласно расчетным формулам. Программа предоставляла возможность получить по совокупности ячеек основные статистические данные (минимум, максимум, среднее, среднеквадратическое отклонение).

Для расчета термодинамических характеристик почв предложено [9] минеральную часть почвы представлять суммой оксидов, а для расчетов энергии кристаллической решетки и свободной энергии Гиббса использовать данные валового химического состава почв. Количество энергии кристаллической решетки в отдельных оксидах приведено в работе [9], энергия Гиббса и энтропия представлены в [11]. С использованием этого методического приема рассчитаны энергетические характеристики для типичных материнских пород лесостепной зоны (для сравнения представлен гумусовый горизонт серой лесной почвы). Определение валового химического состава пород выполнено с применением рентгенофлуоресцентного анализатора «Спектроскан МАКС-GV» по методике измерений массовой доли 17 металлов и оксидов.

**Результаты и обсуждение.** Для неформального оценивания климатической и литологической детерминированности в формировании той или иной величины биоэнергетического потенциала территории важно вовлечь в анализ такой диапазон изменения морфологической выраженности процессов, который характеризует максимально возможную экологическую амплитуду параметров. Аналитическая связь между климатическими затратами на почвообразование (Q) и предельной мощностью гумусового горизонта впервые была обоснована в работе [12] для отражения почвенно-географической зональности, а в последующем [13] эта зависимость была детализирована по данным почвенных провинций и агроклиматических районов Восточно-Европейской рав-



Рис. 1. Распределение годовой величины затрат радиационной энергии на почвообразование, МДж/м<sup>2</sup>·год

нины ( $n = 215$ ). Это позволило не только усилить эмпирическое обеспечение при анализе почвенно-климатических отношений, но и увязать закономерности широтной зональности ландшафтов с градиентом континентальности, то есть с провинциальными различиями климата, обусловленными циркуляционными процессами. Установленная зависимость предельной мощности гумусового горизонта от современных энергетических (климатических) затрат на почвообразование может быть обусловлена зависимостью суммарной мощности морфологически обособляемых гумусово-аккумулятивного и гумусового переходного почвенных горизонтов от вертикального распределения корневой фитомассы (опада), температуры, влажности (сезонного промачивания), промерзания и пр. Функционально этот геогоризонт соответствует подземным ярусам экосистемы, в которых реализуется углерод-депонирующая функция почвы [14].

Для оценки годичного прироста чистой первичной продукции привлечены

результаты исследований одного из авторов работы [15], а также большой массив данных по годичному приросту основных зональных фитоценозов Восточно-Европейской равнины, Центрального Казахстана и юга Западной Сибири, опираясь на обобщающие работы по этой проблеме [16, 17 и др.] и региональные исследования разных лет. Аналитическое выражение зависимости средней годичной продукции растительности (по массе сухого вещества) —  $F$ , т/га в год от энергетических затрат на почвообразование  $Q$ , МДж/(м<sup>2</sup>·год) имеет вид:

$$F = 8,7 \cdot 10^{-8} \cdot Q^{2,69},$$

$$\eta \pm t_{0,5} S_{\eta} = 0,85 \pm 0,13.$$

Количество ежегодной энергии, затрачиваемой на почвообразование в российской части Восточно-Европейской равнины, составляет в среднем 885 МДж/м<sup>2</sup>, изменяясь от 500—700 МДж/м<sup>2</sup> в зонах тундры, лесотундры, полупустыни и до 1430 МДж/м<sup>2</sup> в степных районах Предкавказья (рис. 1).



Рис. 2. Распределение потенциальной чистой первичной продукции растительности (по массе сухого вещества), т/га в год

Территориальные закономерности современных энергетических (климатических) затрат на почвообразование могут быть легко трансформированы в распределение предельной мощности гумусового горизонта почв. Но при этом следует учитывать уже на субрегиональном уровне особенности гранулометрического и минералогического состава почвообразующих пород.

Наибольшие потенциальные значения прироста чистой первичной продукции (12—26 т/га в год) выявлены в полосе от лесостепи до Большого Кавказа (рис. 2), где лугопастбищные травы могут содержать до 16,19 МДж/кг энергии [3]. Хотя расчетные формулы учитывают только климатическую обусловленность такого распределения, известно, что эти территории отличаются благоприятными биоклиматическими и почвенными условиями.

Представленное на рис. 2 распределение потенциальной годичной продукции растительности несколько отличается от предыдущих построений [18] и носит зонально-провинциальный характер. Это связано с тем, что в использованной формуле биоэнергетической оценки факторы тепла и влаги учтены с помощью криволинейных зависимостей, что более адекватно отражает экологические следствия. К примеру, по нашим оценкам потенциальный прирост фитомассы в Прикаспийской полупустыне не превышает 6 т/га (у других авторов больше), а в близкой к ней степной зоне этот показатель увеличивается в четыре раза. Широким диапазоном величин годичного прироста первичной продукции отличаются лесостепные ландшафты: от 9 т/га в Предуралье до 15 т/га в юго-западной части России.

Энергетическая основа биогеоценозов определяется запасами и ежегодным опадом надземной фитомассы и опадом корней, мортмассой микро- и мезофауны, а также запасами органического вещества, аккумулярованного в почве в качестве детрита и гумусовых веществ разной природы. При этом возможное образование гумуса за счет опада увеличивается от дубрав к настоящим степям и уменьшается к сухим степям, однако отношение ежегодного образованного гумуса к ежегодному опад [19] остается одинаковым для указанных экосистем и в среднем равно 0,30.

Расчеты по данным [20] с использованием зависимости, предложенной в [3], показывают, что в метровом слое энергозапасы гумуса (в МДж/га) в серой лесной почве составляют 5,63, в темно-серой почве — 9,74, в черноземе выщелоченном — 10,18, в черноземе типичном — 10,61, в черноземах обыкновенном и южном — 9,09 и 5,84 соответственно.

На региональном уровне оценки энергетического состояния геосистем дополнительным фактором территориальной дифференциации становится минералогический состав почвообразующих пород и гранулометрия почвогрунтов, определяющая особенности потоков миграционной системы. Почвенные ресурсы, вовлеченные в сельскохозяйственную деятельность на территории Белгородской области, характеризуются доминированием таких почвообразующих пород, как лёссы и лёссовидные суглинки. Однако для природных и полуприродных ландшафтов роль мело-мергелей, глин разного генезиса и возраста более значительна.

Благоприятность для процесса почвообразования различных типов материнских пород можно оценить по сумме элементов, являющихся основой жизни, и обычно аккумуляющихся в почвах (Si, Al, Fe, Mn, Ca, K, P). По этому критерию основные почвообразующие породы, представленные в Белгородской области, располагаются в следующий ранжированный ряд: лёссовидные суглинки > зеленовато-серые глины > красно-бурые глины (таблица), что подтверждается суммой энергии Гиббса и энтропии, которая показывает изменение энергии при постоянной температуре и изменяющемся объеме. Элювий мела содержит 98,5 % CaO, много натрия и поэтому очень мало обеспечен элементами-биофилами за исключением валового фосфора, по которому он отличается самым высоким содержанием — 0,245 %.

В гумусово-аккумулятивном горизонте (0—37 см) агросерой почвы по сравнению с ее почвообразующей породой (лёссовидным суглинком с глубины 1,25 м) элементы-биофилы формируют следующий ранжированный ряд оксидов:  $P_2O_5 > Fe_2O_3 > K_2O > SiO_2 > Al_2O_3$ , причем средний коэффициент накопления этих элементов достигает 1,61. Лёссовидный суглинок с глубины 2,7 м, не охваченный процессом почвообразования, отличается от почвообразующей породы (на глубине 1,25 м) более высоким содержанием таких оксидов, как  $SiO_2 > K_2O > Fe_2O_3 > Al_2O_3$ , со средним коэффициентом превышения 1,13.

Энергетические показатели помимо пород достаточно объективно отражают особенности эколого-ресурсного потенциала различных почв. Так, лесостепные

Таблица

Энергетические показатели основных почвообразующих пород Белгородской области (аналитик М. Е. Родионова)

Порода	Цвет по Манселлу (сухой образец)	Сумма элементов биофилов, %	Показатели энергии	
			энергия Гиббса, кДж/г	энтропия, кДж/(г·К)
Почва (гор. А, 0—37 см)	10YR 5/2 серовато-коричневый	85,8	26,53	58,30
Лёсс, $h = 125$ см	10YR 8/2 белый	79,8	28,76	54,86
Лёсс, $h = 270$ см	10YR 7/3 очень слабо-коричневый	83,8	27,34	57,32
Красно-бурые глины	5YR 5/6 желтовато-красный	76,8	22,31	51,19
Зеленовато-серые глины	5Y 7/4 слабо-желтый	81,9	25,51	54,87

почвы, формирующиеся под травянистой растительностью, характеризуются содержанием в верхнем горизонте суммы элементов-биофилов 86,3—89,5 %, величинами энергии Гиббса 26,2—27,2 и энтропии 60—62 кДж/(г·К), тогда как серая лесная почва под дубравой (заповедный участок «Лес на Ворскле») по этим показателям им уступает: 79, 24 и 55 % соответственно.

В заключение отметим, что универсальность энергетического подхода к оценке геосистем связана и с возможностью количественного сопоставления природно-ресурсного потенциала как

отдельных компонентов, так и системы в целом и с оценкой процессов энергообмена, в значительной мере определяющей меру устойчивости геосистем и их способность выполнять важнейшие экологические функции.

*Работа выполнена по проекту «Проведение поисковых НИР по направлению «География и гидрология суши» (№ ГК П743) мероприятия 1.2.1 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг.».*

### Библиографический список

1. Волобуев В. Р. Биоэнергетика и ее задачи // Вестник АН СССР. — 1969. — № 4. — С. 78—81.
2. Горшков В. Г., Дольник В. Р. Энергетика биосферы // Успехи физических наук. — 1980. — Т. 131. — Вып. 3. — С. 441—478.
3. Володин В. М., Масютенко Н. П. Энергетические показатели черноземных почв // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. — 1993. — № 6. — С. 12—15.
4. Кочетов И. С., Лукин С. В., Лисецкий Ф. Н., Марциневская Л. В. Оценка энергетической эффективности адаптивно-ландшафтной системы земледелия в ЦЧР // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. — 2000. — № 6. — С. 21—23.
5. Алпатьев А. М. Развитие и преобразование и охрана природной среды. — Л.: Наука, 1983. — 240 с.
6. Добровольский Г. В., Никитин Е. Д. Сохранение почв как незаменимого компонента биосферы. — М.: Наука, МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000. — 185 с.
7. Яцкевич В. В. Диалектика оптимального выбора. — Киев: Наукова думка, 1990. — 95 с.
8. Волобуев В. Р. Некоторые вопросы энергетики почвообразования // Почвоведение. — 1958. — № 7. — С. 18—25.
9. Волобуев В. Р. Введение в энергетику почвообразования. — М.: Наука, 1974. — 126 с.
10. Волобуев В. Р. Энергетика почвообразования // Изв. АН СССР. Сер. биол. — 1959. — № 1. — С. 45—54.
11. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочное издание в 4-х т. / Л. В. Гурвич, И. В. Вейц, В. А. Медведев и др. — М.: Наука, 1982. — Т. 4. — Кн. 1. — 623 с.
12. Лисецкий Ф. Н. Оценка скорости воспроизводства почвенного ресурса // Доклады ВАСХНИЛ. — 1987. — № 6. — С. 16—18.
13. Лисецкий Ф. Н., Ергина Е. И. Развитие почв Крымского полуострова в позднем голоцене // Почвоведение. — 2010. — № 6. — С. 643—657.
14. Голеусов П. В., Лисецкий Ф. Н. Воспроизводство почв в антропогенно нарушенных ландшафтах лесостепи. — М.: ГЕОС, 2009. — 210 с.
15. Лисецкий Ф. Н. Пространственно-временная оценка растительной продукции как фактора почвообразования // Почвоведение. — 1997. — № 9. — С. 1055—1057.
16. Зубов С. М. Природные комплексы и продуктивность растительности СССР. — Минск: Изд-во Бел. гос. ун-та, 1978. — 168 с.
17. Базилевич Н. И. Биологическая продуктивность почвенно-растительных формаций СССР // Известия АН СССР. Серия географическая. — 1986. — № 2. — С. 49—67.
18. Будынь М. И. Климат и жизнь. — Л., 1971. — 472 с.
19. Кононова М. М. Процессы превращения органического вещества и их связь с плодородием почвы // Почвоведение. — 1968. — № 8. — С. 17—26.
20. Орлов Д. С., Бирюкова О. Н., Суханова Н. И. Органическое вещество почв Российской Федерации. — М.: Наука, 1996. — 256 с.