

Методика энергетической оценки экосистемы первой надпойменной террасы р. Ушайки (Томская область)

И. Г. ГРАЧЕВ

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, Томск, Академический пр., 10/3
E-mail: grachevitces@gmail.com

Статья поступила 08.08.2023

После доработки 01.12.2023

Принята к печати 12.01.2024

Аннотация

Анализ современных научных представлений показал, что отсутствует единое мнение по определению энергии органического вещества в экосистемах, а текущие методики нуждаются в детализации. В статье представлены результаты применения методики покомпонентной оценки количества энергии органического вещества экосистемы с применением энергетического подхода. Методика представляет собой определение энергетических показателей для фитомассы, мортмассы и почв, а также изучение основных источников энергии, участвующих в формировании экосистемы. Исследования проводились на первой надпойменной террасе правобережья р. Ушайки в Томской области, покрытой преимущественно луговой растительностью с единичными деревьями сосны обыкновенной. Материал для апробации методики получен в полевых условиях в масштабе на уровне ландшафтной фации. В лабораторных условиях энергопотенциал рассчитывался методами определения теплоты сгорания при непосредственном сжигании с использованием калориметра для фракций модельного дерева, травяной растительности, мортмассы. По результатам исследования основными источниками энергии для экосистемы являются Солнце и выпадающие осадки, которые предоставляют $3,357 \cdot 10^9$ Дж/м²/год. Суммарное количество энергии органического вещества экосистемы на текущий момент, представляющее ее энергетический потенциал, составляет $1,523 \cdot 10^{13}$ Дж/га, из которых энергопотенциал фитомассы травяного покрова – $55,01 \cdot 10^9$ Дж/га, древесных насаждений сосны обыкновенной – $1,29 \cdot 10^{13}$ Дж/га, мортмассы – $43,058 \cdot 10^9$ Дж, почв – $6,754 \cdot 10^{12}$ Дж. Результаты проведенной работы могут быть применены для ведения сельского хозяйства, территориального районирования, мониторинга, рекреации, создания специальных экологических зон.

Ключевые слова: органическое вещество, пофракционная оценка, энергетический подход, энергопотенциал, суммарная энергия.

ВВЕДЕНИЕ

В целях понимания закономерностей развития экосистем, а также дальнейшего их сохранения возникает потребность в точной и детальной оценке органического вещества в различных пулах экосистем. Начиная с конца XX в. рядом ученых проводились исследования с применением энергетической оценки,

основные различия в которых заключаются в целях и применяемых методах [Ахмедова, Идзииев, 2012; Илюшенко, 2014; Безгубов, Часовников, 2015; Мустафаев, Маймеков, 2015]. Так, работа А. С. Миндрина [1997] посвящена сокращению энергетических затрат при эксплуатации агроландшафтов. Им были разработаны методики определения энерге-

тических эквивалентов, нормативы и показатели энергоемкости в сельском хозяйстве, даны рекомендации по рационализации использования энергетических ресурсов. Исследование А. С. Миндрина в большей степени акцентировано на повышение энергоэффективности сельскохозяйственного производства, основное внимание уделяется изучению технологической составляющей использования агроландшафтов. Как отмечает Б. И. Кочуров [Кочуров, Марунич, 2018], Миндриным не учитываются естественные условия формирования экосистем, а именно энергетические показатели солнечной энергии, осадков, почв. В своих работах Б. И. Кочуров [Кочуров, Марунич, 2016, 2018] приводит не только теоретическую аргументацию применения экологово-энергетического анализа экосистем, но и производит расчет экологической емкости для лесной экосистемы Приднестровья. Автором научно обоснованы и применены технологические методы для лесовосстановительных работ в данном районе, которые основаны на энергетических показателях, произведена энергометрологическая оценка затрат производства. Для расчетов учитывается как антропогенный вклад на восстановление, так и энергетические возможности самой экосистемы (энергия солнца, энергия выпадающих осадков, энергия почвенного покрова, биопродуктивность). Расчеты производятся в первую очередь для древесных пород, но не уделяется внимание ярусам кустарников и травяной растительности, а оценка древостоя проведена лишь по необходимым для целей исследования фракциям. В. М. Володиным [2000] была разработана методика определения экологической емкости и биоэнергетического потенциала агроландшафтов, в которой основное внимание сосредоточено на необходимости оценки элементарных ландшафтов, так как подобная оценка является более репрезентативной. Данный подход основан на определении запасов количества энергии надземной и подземной фитомассы, почв, ежегодного прироста энергии фитомассы, а также разницы в приросте/убыли энергии органического вещества почвы. Кроме того, автором отмечается важность в проведении оценки учета различных фракций фитомассы (травяной покров, корни, ствол, ветки и др.). Тем не менее при проведении оценки органического вещества отсут-

ствуют данные по входящим потокам энергии, а расчеты производятся для преимущественно пахотного слоя (0–25 см). Поскольку для определения количества энергии оценивается изменение в органическом веществе за вегетационный период, используемую формулу следует отнести, скорее, к балансовому методу оценки, нежели для количественной оценки энергетических запасов.

На текущий момент наиболее популярным объектом исследования при энергетической оценке органического вещества являются сельскохозяйственные экосистемы [Шуркина, 2009; Фузелла, 2010; Чикинова, 2012; Самойлова, 2013; Мусихина и др., 2014; Pozdnyakov et al., 2019]. В этих работах главным образом осуществляется оценка либо определенных компонентов экосистемы, либо сокращение энергетических затрат при производстве сельскохозяйственной продукции. Таким образом, степень изученности проблемы оценки органического вещества в естественных экосистемах на сегодняшний день остается недостаточной. Возникает необходимость в проработке методик по комплексной энергетической оценке различных естественных экосистем, знания о которых могут быть применены в том числе и для антропогенных ландшафтов. Текущее исследование основано на оценке энергетических потенциалов, т. е. показателях содержания энергии в органическом веществе того или иного компонента экосистемы. Основными пулами для проводимого исследования были определены энергопотенциалы фитомассы травяного покрова и древесных насаждений, мортмассы, почвы. Помимо расчета количества энергии органического вещества для указанных пуль, необходимо исследовать условия ее формирования, а также определить соотношение значений энергопотенциалов экосистемы.

Целью работы является апробация методики пофракционной оценки энергетических потенциалов органического вещества на примере ландшафтной фации первой надпойменной террасы р. Ушайки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для проведения работ построен трансект на правом побережье р. Ушайки в Томском районе Томской области, в зоне южной тайги

Западно-Сибирской равнины. Данный трансект включает в себя несколько дифференцированных ландшафтных фаций. Участок трансекта, представляющий собой элементарный луговой ландшафт в пределах первой надпойменной террасы р. Ушайки, является объектом исследования для данной работы. Изучаемая территория относится к пролювиальной трансаккумулятивной выровненной части первой надпойменной террасы р. Ушайки с отдельно стоящими насаждениями сосны обыкновенной с осоково-луговой разнотравной растительностью на серых лесных почвах на участке площадью 32,14 м². Растительность представлена преимущественно следующими видами: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), малина обыкновенная (*Rubus idaeus L.*), ежа сборная (*Dactylis glomerata L.*), пырей ползучий (*Elytrigia repens (L.) Nevskaia*), бодяк щетинистый (*Cirsium setosum (Willd.) Besser*), борщевик рассеченный (*Heracleum dissectum Ledeb.*), герань двулистная (*Geranium bifolium Patrin ex DC.*), горошек лесной (*Vicia sylvatica L.*), дудник лесной (*Angelica sylvestris L.*), клевер луговой (*Trifolium pratense L.*), вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis L.*), крапива двудомная (*Urtica dioica L.*), лютик ползучий (*Ranunculus repens L.*), манжетка обыкновенная (*Alchemilla vulgaris L.*), недотрога обыкновенная (*Impatiens noli-tangere L.*), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale F. H. Wigg.*), осот полевой (*Sonchus arvensis L.*), полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris L.*), скерда сибирская (*Crepis sibirica L.*), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium L.*), фиалка удивительная (*Viola mirabilis L.*), чина гороховидная (*Lathyrus pisiformis L.*), чина луговая (*Lathyrus pratensis L.*) и др. Основная площадь покрытия представлена многолетними травянистыми растениями. Почвы на исследуемом участке относятся к отделу текстурно-дифференцированных почв, к типу серых почв с хорошо выраженным гумусово-элювиальным горизонтом AEL, и являются типичными для зоны южной тайги Западной Сибири.

Полевые работы с описанием ландшафта и профилей почв проводились согласно методике В. К. Жучковой и Э. М. Раковской [Жучкова, Раковская, 2004]. Расчет энергопотенциалов органического вещества производился в модификации метода определения

биоэнергетического потенциала территории по В. М. Володину [Володин, 2000]. Был рассчитан энергопотенциал надземной части фитомассы трав и мортмассы трав (опад) и деревьев (отпад), а подземная часть учтена при расчете негумифицированного органического вещества почв. Энергетический потенциал древесных пород оценивался при непосредственном распиле и взвешивании каждой фракции модельного дерева сосны обыкновенной. Энергопотенциал почв определялся по глубине залегания слоев почвы, содержание гумуса в которых составляло порядка 1 %. Кроме того, в рамках исследования учитывались внешние энергетические источники, которые формируют экосистему, – Солнце и выпадающие осадки. В итоге была рассчитана суммарная энергия органического вещества на текущий момент исследования для естественной экосистемы E_{cur} (МДж/м² или ГДж/га):

$$E_{cur} = E_f \times (S - S_f) + E_m \times (S - S_f) + Q_r \times S + Q_{HB} \times S + E_s, \quad (1)$$

где E_{cur} – количество энергии в органическом веществе, Дж/м²; E_f – количество энергии травяной растительности, Дж/м²; S – площадь территории исследуемой экосистемы, м²; S_f – площадь сечения стволов древесных пород, м²; E_m – количество энергии в мортмассе (опаде и отпаде), Дж/м²; Q_r – запас энергии в гумусе, Дж/м²; Q_{HB} – запас энергии в негумифицированном веществе почвы, Дж/м²; E_s – количество энергии органического вещества древесных насаждений, Дж.

Методы определения входящих потоков энергии. В рамках данного исследования расчет солнечной энергии (E_r) производился посредством учета годовой суммарной радиации (R) и альбедо поверхности (N):

$$E_r = R \times (1 - N). \quad (2)$$

Годовой приход суммарной солнечной радиации R для участка исследования составил 4193 МДж/м² [Невидимова, Янкович, 2015], средний показатель альбедо для травяной растительности $N = 0,2$ [Титлянова и др., 2018].

Энергия в выпадающих осадках в виде дождя и снега вычислена по следующей формуле:

$$E_{pr} = S \times O \times G, \quad (3)$$

где S – площадь исследуемой территории, м^2 ; O – количество выпадающих осадков, $\text{мм}/\text{год}$; G – свободная химическая энергия Гиббса без учета транспирации растениями, $\text{Дж}/\text{г}$.

Для исследуемого участка были взяты общие значения осадков в г. Томске за 2021 г., которые составили 559 $\text{мм}/\text{год}$ [Погода и климат, 2022]. Свободная химическая энергия Гиббса составляет 4,94 $\text{Дж}/\text{г}$, коэффициент пересчета – $1 \cdot 10^6 \text{ г}/\text{м}^3$ [Odum, 1996].

Методы определения энергопотенциала фитомассы трав и мортмассы (опад и отпад). Количество энергии в фитомассе трав и мортмассе (опад и отпад) экосистемы рассчитано с использованием количества энергии, которое изменяется при теплообмене:

$$E = q \times m, \quad (4)$$

где E – количество теплоты, Дж ; q – удельная теплота сгорания, $\text{Дж}/\text{кг}$; m – масса вещества, кг .

Для оценки энергопотенциалов травяного покрова и мортмассы образцы, собранные с участка, высушивали до абсолютно сухого состояния, подвергали экспресс-сжиганию в полевых условиях, а также определяли потери при прокаливании в лабораторных условиях согласно ГОСТ Р 556661-2013 [ГОСТ, 2014]. Исследование экспресс-методом представляет собой количественную оценку содержания органического вещества в растительной биомассе посредством высушивания образцов до воздушно-сухого состояния и постепенного сжигания в печи в полевых условиях. В лабораторных условиях были рассчитаны потери при прокаливании и определена зольность. Образцы высушивали в сушильном шкафу при 105 °C и затем сжигали в муфельной печи. Теплоту сгорания определяли на калориметре типа АБК-1В согласно межгосударственным стандартам ГОСТ 33106-2014 [ГОСТ, 2016].

Методы определения энергопотенциала почв. Запасы энергии в почвах рассчитывали на основе методики определения энергопотенциала органического вещества почвы по Н. П. Масютенко [Масютенко и др., 2004]:

$$Q = Q_r \times Q_{\text{HB}}, \quad (5),$$

где Q – энергопотенциал органического вещества почвы, $\text{ГДж}/\text{га}$; Q_r – запасы энер-

гии в гумусе, $\text{ГДж}/\text{га}$; Q_{HB} – запасы энергии в негумифицированном органическом веществе, $\text{ГДж}/\text{га}$, определяются по [Масютенко и др., 2004]:

$$Q_{\text{HB}} = 18,84 \times \text{HB}, \quad (6)$$

где 18,84 – коэффициент для перевода в энергетические единицы [Масютенко и др., 2004]; HB – негумифицированное органическое вещество, $\text{т}/\text{га}$, находится по формуле

$$\text{HB} = 10^4 \times m \times d \times h/P, \quad (7)$$

где m – вес сухих органических остатков, г ; d – плотность почвы, $\text{т}/\text{м}^3$; h – высота слоя почвы, м ; P – вес воздушно-сухого почвенного монолита, г .

Запасы энергии в гумусе с учетом теплоты сгорания [Масютенко и др., 2004]:

$$Q_u = 2165 \times \Gamma \times H \times d, \quad (8)$$

где 2165 – коэффициент для перевода в энергетические единицы; Γ – содержание общего гумуса, %; H – слой почвы, м ; d – плотность почвы, $\text{т}/\text{м}^3$.

Для определения энергопотенциала почвы сделан почвенный разрез, дано описание почвенных горизонтов, отобран почвенный монолит размером $20 \times 20 \times 46 \text{ см}$, взяты пробы на глубине через каждые 10 см трехкратно. Далее анализировали почвенные образцы следующими методами:

- плотность почвы определялась по методу Качинского [Жучкова, Раковская, 2004];
- сушка в сушильном шкафу при температуре 105 °C согласно ГОСТ 5180-84 [ГОСТ, 2005];
- определение углерода и гумуса в почве с помощью титриметрии по методу И. В. Тюрина [Мазиров и др., 2012].

Методы определения энергетического потенциала древесных насаждений. Образцы анализировались в лаборатории дендрохронологических исследований в ИМКЭС СО РАН на аппарате Lintab с программным обеспечением TSAP. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания для образцов древесной растительности выполнялись по методике В. И. Николаевой [Николаева, 2013] в соответствии с ГОСТ 147-2013 [ГОСТ, 2015].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Количество приходящей энергии. Согласно полученным расчетам, приход солнечной энергии составил $3,354 \cdot 10^9$ Дж/год на 1 м² ($107,81 \cdot 10^9$ Дж/год на весь участок); энергия выпавших осадков равна $2,761 \cdot 10^6$ Дж/год на 1 м² ($88,753 \cdot 10^6$ Дж/год на весь участок). Установлено, что ежегодно территории получает $3,357 \cdot 10^9$ Дж на 1 м² ($107,886 \cdot 10^9$ Дж для всей площади) [Грачев, Фузелла, 2023].

Энергопотенциал фитомассы трав и мортмассы (опад и отпад). Одним из ключевых моментов исследования является расчет запасов энергии органического вещества растений. Результаты полевых и лабораторных исследований представлены в табл. 1, 2. Темпера тура сгорания фитомассы трав в абсолютно сухом состоянии составила 18255,27 кДж/кг, для мортмассы – 18568,22 кДж/кг [ГОСТ, 2016].

В результате экспресс-метода сжигания энергетический потенциал травяного покрова и мортмассы составил $5,45 \cdot 10^6$ и $4,301 \cdot 10^6$ Дж на 1 м²; при определении потерь при прокаливании – $5,527 \cdot 10^6$ и $4,326 \cdot 10^6$ Дж на 1 м² соответственно. Все расчеты проводились с учетом площади сечения ствола модельной сосны.

Стоит отметить, что погрешность при сравнении этих двух методов (определение количества органического вещества экспресс-методом и лабораторным методом сжигания) составила 135,83 г для фитомассы (при весе свежей фитомассы более 33 кг) и 42,92 г для мортмассы (при общем весе мортмассы более 18 кг), что свидетельствует об универсальности и высокой точности проведенных исследований. Разница в показателях закономерна и обусловлена различными значениями запа-

сов вещества мортмассы и фитомассы, главным образом большей удельной теплотой сгорания у мортмассы. Для дальнейшей оценки использовались результаты лабораторных исследований.

Энергопотенциал древесных насаждений. Согласно дендрохронологическим исследованиям установлено, что возраст модельного дерева составляет 59 лет, диаметр на высоте 1,3 м равен 44 см, высота надземной части 2494,7 см, глубина корневища 74 см, общая длина горизонтальных (поверхностных) корней составила 63,241 м, средняя глубина залегания вертикальных (глубинных) корней – 86 см. Результаты дендрохронологических исследований на аппарате Lintab отражены на рис. 1. Схемы расположения горизонтальных и вертикальных корней модельной сосны приведены на рис. 2.

Для каждой из фракций проведены измерения массы в сухом состоянии, зольности. Низшая теплота сгорания в рабочем состоянии составила 18457,89 кДж/кг [ГОСТ, 2015]. Результаты измерений оформлены в табл. 3.

Энергопотенциал почв. Результаты определения содержания гумуса и углерода по методу Тюрина представлены на рис. 3. Общий вес отобранного монолита составил 24295 г., вес корней в абсолютно сухом состоянии – 374,51 г., средние потери при сушке на монолите – 16,706 %, среднее значение плотности монолита $d = 1,322$ т/м³, общее содержание углерода – 2,04 %, гумуса – 3,52 %.

Оценка энергопотенциала почв показала, что запасы энергии в гумусе составили $463,436 \cdot 10^6$ Дж на 1 м² ($14,895 \cdot 10^9$ Дж для всего участка). Содержание негумифицированно-

Т а б л и ц а 1
Результаты сжигания экспресс-методом

Наименование	Общая масса, кг	Вес после сушки, г	Зола, г	Запас органического вещества, г
Травяной покров	33,614	10756,48	1206,877	9549,6
Мортмасса	12,530	8520,442	1110,324	7410,12

Т а б л и ц а 2
Определение потери при прокаливании

Образец	Вес золы, г	Навеска, г	C, %	Выход золы, %
Травяной покров	0,1237	1,3448	7,6239	9,9572
Мортмасса	0,1363	1,1910	8,6425	12,5267

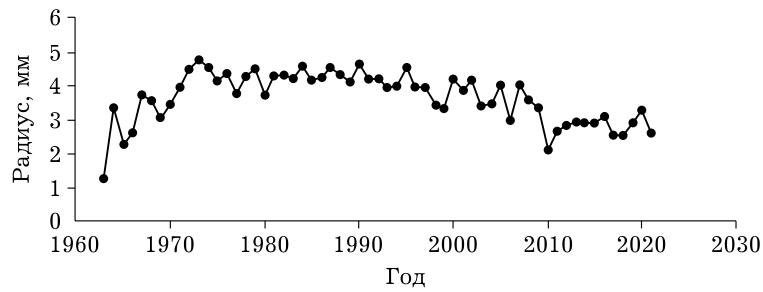


Рис. 1. Среднее значение радиусов годичных колец модельной сосны по годам

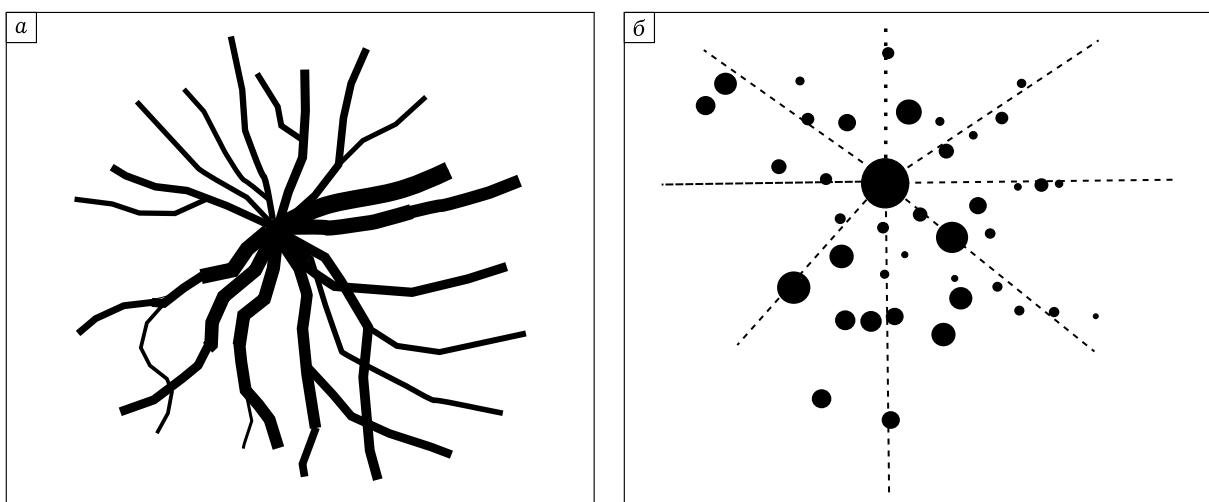


Рис. 2. Схематическое расположение корневой системы модельной сосны: а – горизонтальные корни; б – вертикальные корни

го вещества в почве составило $112,5 \text{ т/га}$, запас энергии $212,03 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ на 1 м^2 ($6,814^9 \text{ Дж}$ для всего участка). Итого энергопотенциал органического вещества почвы на исследуемом участке составляет $675,47 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ на 1 м^2

($21,709 \cdot 10^9 \text{ Дж}$ для всего участка) [Грачев, Фузелла, 2023].

Суммарный энергопотенциал органического вещества экосистемы. Согласно полученным результатам по оценке энергетиче-

Таблица 3
Пофракционная оценка массы и энергии для модельного дерева сосны обыкновенной в подзоне южной тайги Томской области

Фракция	Вес влажный, кг	Вес сухой, кг	Зольность, %	Вес органического вещества, кг	Энергия, Дж
Ствол	1499,45	717,165	1,16	708,846	$13,084 \cdot 10^9$
Ветки крупные	334,35	148,83	1,16	147,104	$2,715 \cdot 10^9$
Корни горизонтальные	170,0034	157,02	2,68	152,812	$2,821 \cdot 10^9$
Корни вертикальные	156,336	135,18	2,21	132,193	$2,440 \cdot 10^9$
Корневище	219,1	104,79	1,16	103,575	$1,912 \cdot 10^9$
Хвоя и мелкие ветки	529,1	223,67	3,81	215,148	$3,971 \cdot 10^9$

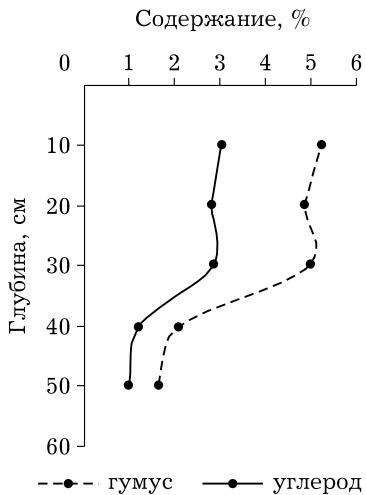


Рис. 3. Содержание углерода и гумуса в профиле почв

ских потенциалов при применении формулы (1) суммарный энергетический потенциал органического вещества экосистемы на момент исследования, с учетом площадных характеристик модельного дерева (площадь сечения ствола согласно диаметру $0,152 \text{ м}^2$), E_{cur} равен $48,967 \cdot 10^9 \text{ Дж}$, распределение энергии отображено в табл. 4. Следует отметить, что данный показатель актуален на момент исследования в конкретной точке развития изучаемой экосистемы, поскольку ее компоненты имеют разновозрастной период становления (согласно источникам [Gavrilov et al.,

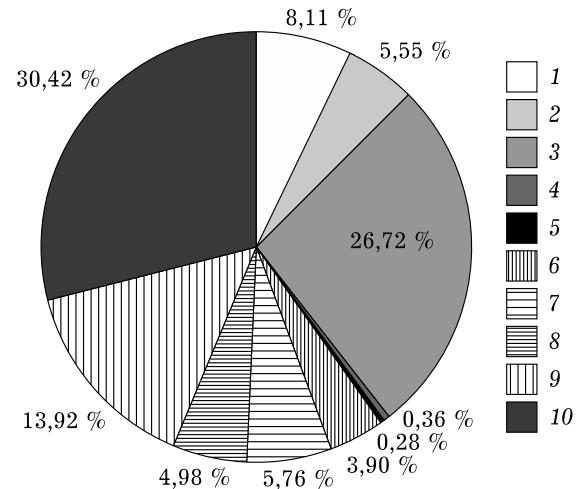


Рис. 4. Энергетическая структура органического вещества экосистемы

1 – энергопотенциал мелких веток и хвои; 2 – энергопотенциал крупных ветвей; 3 – энергопотенциал стволовой древесины; 4 – энергопотенциал травяного покрова; 5 – энергопотенциал мортмассы; 6 – энергопотенциал корневища; 7 – энергопотенциал горизонтальных корней; 8 – энергопотенциал вертикальных корней; 9 – энергопотенциал негумифицированного вещества почвы; 10 – энергопотенциал гумуса

2018], почвы исследуемой территории начали формироваться в постлатантический период голоцен – около 6000 лет назад).

Схематическое распределение энергии органического вещества в исследуемой экосистеме отображено на рис. 4.

Таблица 4
Распределение энергии органического вещества в исследуемой экосистеме с учетом зольности фитомассы и мортмассы

Фракция	Масса, кг	Энергия, Дж
Мелкие ветви и хвоя	215,148	$3,971 \cdot 10^9$
Крупные ветви	147,104	$2,715 \cdot 10^9$
Ствол сосны	708,846	$13,084 \cdot 10^9$
Корневище	103,575	$1,912 \cdot 10^9$
Корни горизонтальные	152,812	$2,821 \cdot 10^9$
Корни вертикальные	132,193	$2,440 \cdot 10^9$
Травяной покров	9,685	$176,802 \cdot 10^6$
Мортмасса	7,453	$138,389 \cdot 10^6$
Гумус	747,808	$14,895 \cdot 10^9$
Негумифицированное вещество почвы	361,575	$6,814 \cdot 10^9$
Всего	2586,199	$48,967 \cdot 10^9$

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные по итогам апробированной методики результаты достаточно тяжело сопоставлять с работами предшественников, поскольку ранее исследования проводились методами, отличными от таковых для экосистем с другими климатическими условиями формирования. Тем не менее для их сравнения необходимо перевести результаты в соответствующую размерность: энергия Солнца – 33540 ГДж/га в год, энергия выпадающих осадков – 27,61 ГДж/га в год, энергия органического вещества фитомассы – 55,01 ГДж/га в год, энергия органического вещества модельной сосны – 8383 ГДж/га за 59 лет, энергия органического вещества мортмассы – 43,058 ГДж/га в год, энергопотенциал почв – 6754 ГДж/га за 6000 лет, запас органического вещества в экосистеме – 15,23 ТДж/га.

Сравнительный анализ полученных результатов показал их наибольшую сопоставимость с работами В. М. Володина [Володин, 2000] и Н. П. Масютенко [Масютенко и др., 2015] из-за сходства применяемых методик по оценке энергетических запасов в экосистемах. Согласно этим авторам, биоэнергетический потенциал территории представляет собой сумму запасов общей энергии фитомассы, ее ежегодный прирост, энергопотенциал почвы, изменение органического вещества почвы. В первую очередь стоит отметить, что эти данные получены статистическими методами, на основе справочных материалов и авторской корреляции В. М. Володина [Володин, 2000]. Основными отличительными чертами методик являются следующие моменты: соотношение данных, полученных в результате исследования на разных глубинах, что влияет на количественные показатели в расчетах, а также учет корневой массы растений. Касательно соотношения данных по глубинам следует отметить, что в текущем исследовании использовались средние данные для низлежащих горизонтов почвы, гумус в которых присутствует и участвует в перемещении энергии во всей экосистеме, а не только в пахотном слое. Учет корневой массы в данном исследовании происходит при расчете энергопотенциала почв, а не как отдельный элемент пула органического вещества. Кроме того, полевые работы проводились в конце ве-

гетационного периода, в конце июля – начале августа, что позволяет не учитывать сами показатели прироста как непосредственно отдельные элементы. Тем не менее при сравнении результатов энергопотенциалов фитомассы травяной растительности полученные автором данные в достаточной мере схожи с показателями энергопотенциала слабо выпасаемой степи (фитомасса – 52,25 ГДж/га, мортмасса – 51,54 ГДж/га), сенокосов северной экспозиции (фитомасса 50,61 ГДж/га) или же ценозов овсяницы луговой (фитомасса 53,08 ГДж/га) по работе В. М. Володина [Володин, 2000]. Более того, сравнительные показатели энергопотенциала почв по учету гумуса практически равны средним показателям темно-серых лесных почв: 4634,36 ГДж/га (согласно текущим данным) и 4543,90 ГДж/га [Володин, 2000].

Б. И. Кочуров и соавт. [Кочуров и др., 2018] определяют основными следующие энергетические критерии: энергия Солнца (расчет через интенсивность солнечного излучения), энергетический потенциал выпадающих осадков [Odum, 1996], а также энергопотенциал гектара леса (расчет через запас древесины и количества энергии на 1 м³ в древесине). Количество солнечной энергии и энергии осадков рассчитывается по схожим формулам, ввиду различных климатических показателей и географического положения результаты отличаются, но сопоставимы: входящий поток энергии, согласно авторам [Кочуров, Марунич, 2020], для урочища Калагур в Приднестровье равен $47,3 \cdot 10^{12}$ Дж в год, для подзоны южной тайги Томского района – $33,567 \cdot 10^{12}$ Дж в год. Энергопотенциал леса, как главный критерий для сравнения органического вещества, определялся на основе энергетических показателей древесины того или иного вида и ее объемных характеристик [Кочуров и др., 2018]. Так, для геосистемы с минимальным антропогенным воздействием, в которой основной лесообразующей породой (83 %) является дуб черешчатый, энергетический потенциал составляет $2,8 \cdot 10^{12}$ Дж/га. При сопоставлении с текущим исследованием в условиях интерполяции данных модельного дерева на площадь 1 га энергетический потенциал стволовой древесины равен $4,071 \cdot 10^{12}$ Дж/га. Текущая разница в показателях обосновывается рядом факторов:

различные лесообразующие породы, климатические условия, интерполяция результатов на большие площади, густота лесных насаждений, возраст древесных пород. Тем не менее при возможностях учета травяного и кустарничкового покровов, мортмассы, энергопотенциала почв, пофракционном аллометрическом моделировании древостоя в урочище Калагур можно будет получить более точные данные, которые не противоречат текущему исследованию.

Таким образом, предыдущие исследования проводились на значительных площадях, что предполагает использование статистических данных. Такой подход охватывает большие территории, но использование статистических данных приводит к уменьшению точности исследований. Полученные результаты могут дополнить и корректировать методики в предложенных ранее работах, что позволит более детально характеризовать процессы в пулах органического вещества экосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что ежегодно данная территория получает $3,357 \cdot 10^9$ Дж на 1 m^2 (или $107,886 \cdot 10^9$ Дж для всей исследуемой площади) посредством основных источников – солнечной энергии E_r и энергии выпадающих осадков E_{pr} . Эта энергия затрачивается на поддержание функционирования экосистемы, на процессы трансформации и аккумуляции потоков вещества и энергии между ее компонентами.

В условиях интерполяции полученных результатов на 1 га первой надпойменной террасы правобережья р. Ушайки Томского района наибольшим энергетическим потенциалом органического вещества обладает серая лесная почва – $6,754 \cdot 10^{12}$ Дж/га, что составляет 44,33 % от текущего количества аккумулируемой энергии экосистемы. $4,634 \cdot 10^{12}$ Дж/га (или 30,42 %) энергии приходится на гумус почв, $2,12 \cdot 10^{12}$ Дж/га (или 13,92 %) энергии содержится в негумифицированном органическом веществе почв. Чуть меньше энергии аккумулировано в органическом веществе надземной части древостоя сосны обыкновенной – $6,151 \cdot 10^{12}$ Дж/га (40,37 %). В органическом веществе корневой системы сосны обыкновенной накоплено порядка $2,232 \cdot 10^{12}$ Дж/га

(14,65 %). Значительно меньше энергии накапливается в травяном покрове и мертвый массе органического вещества биотопа. Энергетический потенциал травяной растительности составляет $55,01 \cdot 10^9$ Дж/га (0,36 %), мортмассы – $43,058 \cdot 10^9$ Дж/га (0,28 %). Исследуемые энергетические потенциалы – это энергия, созданная и трансформированная в естественных условиях, без антропогенного воздействия; именно она демонстрирует возможности органического вещества в функционировании естественной экосистемы. Таким образом, на текущий момент исследования в органическом веществе суммарный энергетический потенциал равен $1,523 \cdot 10^{13}$ Дж/га.

С помощью полевых и лабораторных исследований впервые была применена методика для комплексной оценки энергетических запасов органического вещества экосистемы в Томской области. Предлагаемую методику можно корректировать в зависимости от поставленных задач. Пространственное районирование, основанное на оценке энергопотенциалов, представляет собой научный ресурс, который может быть использован для оптимизации будущей модели территориального развития регионов. Изучение энергетических характеристик органического вещества позволяет выявлять закономерности явлений в экосистемах, данные о которых могут быть использованы для мониторинга и прогнозирования функционирования экосистем в условиях не только состояния динамического равновесия, но и при возможных катастрофических явлениях природного или антропогенного характера.

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю А. В. Позднякову за предоставление идей и неоцененную помощь в реализации исследования, а также Т. Ш. Фузелле за помощь в проведении полевых и лабораторных работ.

Вклад автора

Все этапы исследования осуществлены лично автором.

Финансирование

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научной темы “Развитие системы мониторинга и комплексного анализа пулов и потоков парниковых

газов болотных и лесных экосистем Западной Сибири”, FWRG-2022-0001.

Соблюдение этических стандартов

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов

Автор данной статьи заявляет, что у него нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Ахмедова Л. Ш., Идзинев Г. И. Энергетический потенциал устойчивого развития региона // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. № 42. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energeticheskiy-potentsial-ustoychivogo-razvitiya-regiona> (дата обращения: 27.02.2023).
- Безгубов В. А., Часовников С. Н. К вопросу об экологической емкости территории и способах ее оценки // Фундамент. исследования. 2015. № 12. С. 751–754.
- Володин В. М. Методические определения экологической емкости и биоэнергетического потенциала территории агроландшафта. Курск: ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии, 2000. 32 с.
- ГОСТ 147-2013 (ISO 1928:2009) Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания. М.: Стандартинформ, 2015.
- ГОСТ 33106-2014 (EN 14918:2009) Биотопливо твердое. Определение теплоты сгорания М.: Стандартинформ, 2016.
- ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2005.
- ГОСТ Р 55661-2013 Топливо твердое минеральное. Определение зольности. М.: Стандартинформ, 2014.
- Грачев И. Г., Фузелла Т. Ш. Оценка энергетического потенциала органического вещества на примере экосистемы первой надпойменной террасы реки Ушайка Томской области // Азимут геонаук: материалы всепр. междисципл. молод. науч. конф., г. Томск, 6–9 декабря 2022 г. Вып. 3. Томск: Изд-во Том. ЦНТИ, 2023. С. 318–321.
- Жучкова В. К., Раковская Э. М. Методы комплексных физико-географических исследований: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Академия, 2004. 368 с.
- Ильюшенко Н. А. Экологическая емкость урбосистемы города Петропавловска-Камчатского // Вестн. Камчат. гос. тех. ун-та. 2014. № 30. С. 64–71.
- Кочуров Б. И., Марунич Н. А. Оценка эмержентных свойств ландшафтов Приднестровья методами гео-энергетического подхода // Экол. системы и природы. 2020. № 5. С. 35–41. doi: 10.25791/esip.05.2020.1156
- Кочуров Б. И., Марунич Н. А. Энергетический подход к изучению геосистем и технологий лесовосстановления Приднестровья // Юг России: экология, развитие. 2016. Т. 11, № 1 (38). С. 159–169.
- Кочуров Б. И., Марунич Н. А. Эколого-энергетический анализ экосистем. М.: ИНФРА-М, 2018. 144 с.
- Кочуров Б., Марунич Н., Лобковский В., Хазиахметова Ю., Фомина Н. Геоэнергетическая оценка лесных экосистем Приднестровья // Проблемы безперервной географічної освіти і картографії: Збірник наукових праць. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2018. Вип. 28. С. 54–60.
- Мазиров М. А., Шеин Е. В., Корчагин А. А., Шушкевич Н. И., Дембовецкий А. В. Полевые исследования свойств почв: учеб. пособие к полевой практике для студентов, обучающихся по направлению подготовки – почвоведение / Влад. гос. ун-т. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2012. 72 с.
- Масютенко Н. П., Кузнецов А. В., Масютенко М. Н. и др. Методологические аспекты формирования экологически сбалансированных агроландшафтов // Земледелие. 2016. № 7. С. 5–9.
- Масютенко Н. П., Чуян Н. А., Кузнецов А. В., Брескина Г. М., Масютенко М. Н. К усовершенствованию теоретических основ формирования экологически сбалансированных агроландшафтов // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29, № 8. С. 10–14.
- Масютенко Н. П., Шеховцова В. В., Шеховцов В. И. Научные основы и методы оценки энергетического состояния почв в агроландшафтах. Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2004. 60 с.
- Миндрик А. С. Энергоэкономическая оценка сельскохозяйственной продукции: дис. ... д-ра экон. наук. М., 1997. 291 с.
- Мусихина Е. А., Айзенберг И. И., Михайлова О. С. Пространственно-временной метод оценки экологической емкости территорий // Системы. Методы. Технологии. Братск: Братский гос. ун-т, 2014. № 2 (22). С. 175–178.
- Мустафаев К. Ж., Маймеков З. К. “Экологический след” – основа для оценки экологической емкости природной среды Казахстана // Гидрометеорология и экология. 2015. № 3. С. 126–137.
- Невидимова О. Г., Янкович Е. П. Энергетические ресурсы солнечной радиации и ветра на территории Томской области // Успехи соврем. естествознания. 2015. № 11. С. 134–138.
- Николаева В. И. Методы исследования свойств твердых топлив: учеб. пособие / сост. В. И. Николаева, К. В. Буваков, Р. Б. Табакаев; Том. политехн. ун-т. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2013. 92 с.
- Погода и климат. Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Томске. URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/29430_2.htm (дата обращения: 14.02.2022)
- Самойлова Н. В. Методика энергоэкономической оценки сельскохозяйственного производства через энергетические эквиваленты стоимости продукции отраслей // Изв. Тимирязевской с.-х. академии. 2013. № 6. С. 94–101.
- Титлянова А. А., Базилевич Н. И., Снытко В. А. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. 2-е изд., испр. и доп. Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 2018. 110 с.
- Фузелла Т. Ш. Энергетический подход к определению эффективности и оптимизации функционирования агрокосистем (на примере СПК “Нелюбино”): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2010. 23 с.
- Чикинова М. С. Эколого-энергетический подход к оценке инфраструктурного потенциала территории юга Западной Сибири // Вестн. Сиб. гос. ун-та путей сообщения. 2012. № 26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-energeticheskiy-podkhod-k-otsenke-infrastruktturnogo-potentsiala-territorii-yuga-zapadnoy-sibiri> (дата обращения: 18.01.2023).

- Шуркина К. А. Анализ функционирования агроэкосистем с позиции энергетического подхода (на примере крестьянского хозяйства “СоМер-2”): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: РГБ, 2009. 23 с.
- Gavrilov D. A., Loiko S. V., Klimova N. V. Holocene Soil Evolution in South Siberia Based on Phytolith Records and Genetic Soil Analysis (Russia) // Geosciences. 2018. Vol. 8 (11). 402. P. 1–17.
- Odum Howard T. Environmental accounting: ENERGY and environmental decision-making. N. Y., 1996. 370 p.
- Pozdnyakov A. V., Semenova K. A., Fuzella T. S. Energy-based measuring of ecological and economic effectiveness of agroecosystems // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2019. Vol. 232, N 1.

Energy assessment methodology ecosystems of the first floodplain terrace of the Ushayka river (Tomsk region)

I. G. GRACHEV

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of SB RAS
10/3, Academicesky ave, Tomsk, 634055, Russia
E-mail: grachevimces@gmail.com*

The analysis of modern scientific ideas has shown that there is no consensus on the definition of the energy of organic matter in ecosystems, and current methods need to be detailed. The article presents the results of the application of the method of component-by-component assessment of the amount of energy of the organic matter of the ecosystem using the energy approach. The methodology is the determination of energy indicators for pools of phytomass, mortmass and soils, as well as the study of the main energy sources involved in the formation of the ecosystem. The research was carried out on the first above-floodplain terrace of the right coast of the Ushayka River in the Tomsk region. The materials for testing the technique were obtained in the field on a scale at the level of landscape facies. In laboratory conditions, the energy potential was calculated by methods of determining the heat of combustion during direct combustion using a calorimeter for fractions of model wood, phytomass and mortmass. According to the results of the study, the main sources of energy for the ecosystem are the Sun and precipitation, which provide $3.357 \cdot 10^9$ J/m²/year. The total amount of energy of the organic matter of the ecosystem at the moment, representing its energy potential, is $1.523 \cdot 10^{13}$ J/ha, of which the energy potential of grass cover phytomass is $55.01 \cdot 10^9$ J/ha, common pine tree stands – $1.29 \cdot 10^{13}$ J/ha, mortmass – $43.058 \cdot 10^9$ J, soils – $6.754 \cdot 10^{12}$ J. The results of the work carried out can be applied to agriculture, territorial zoning, monitoring, recreation, creation of special ecological zones.

Key words: organic matter, fractional estimation, energy approach, energy potential, total energy.