ГЕОЭКОЛОГИЯ/GEOECOLOGY

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.105

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОПОТЕНЦИАЛА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ЛЕСНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ: ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ПОЧВЕ

Научная статья

Грачев И.Г.[1, *], Невидимова О.Г.[2]
[1] ORCID : 0000-0002-9871-011X;
[1, 2] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (grachevimces[at]gmail.com)

Аннотация

Представлены результаты комплексной оценки энергии, содержащейся в органическом веществе лесной экосистемы южной тайги Западной Сибири. На примере трансэлювиального участка крутого склона надпойменной террасы реки Ушайка Томского района проведен анализ энергетических потенциалов пулов растительности и почвы экосистемы, а также их внутрисистемная дифференциация. Посредством полевых и лабораторных исследований на основе расчета удельной теплоты сгорания и определения массы органического вещества в том или ином пуле, найдены значения энергетических потенциалов для фитомассы травяного покрова, мортмассы, гумуса, негумифицированного органического вещества почв, наземной и подземной фракций фитомассы сосны обыкновенной и березы бородавчатой. Установлено крайне неравномерное распределение энергии в органическом веществе на изучаемом трансэлювиальном участке трансекта: около 68% энергии сосредоточено в фитомассе сосны обыкновенной, 5% энергии приходится на фитомассу березы, порядка 24% энергии сосредоточено в энергопотенциал почвы, остальная энергия в меньших долях распределена в мортмассе и травяном покрове. В ходе проведенного исследования выявлены зависимости энергетических показателей и их распределения от орографических особенностей элементарного ландшафта, теплотворной способности органического вещества, его количественного содержание на изучаемой территории, глубины залегания почвообразующих пород. Применение используемых в данном исследовании методических приемов позволит получить объективные и детальные результаты при покомпонентной оценке не только естественных, но и антропогенных экосистем. Результаты исследований могут быть применены для решения задач оптимизации и рационализации в сельском хозяйстве, лесной промышленности, для целей мониторинга естественных экосистем, экологического прогнозирования.

Ключевые слова: органическое вещество, лесная экосистема, энергетический подход, распределение энергии, теплота сгорания вещества, энергопотенциал.

A QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE ENERGY POTENTIAL OF ORGANIC MATTER IN FOREST ECOSYSTEMS: DISTRIBUTION PATTERNS IN VEGETATION AND SOIL

Research article

Grachev I.G.[1, *], Nevidimova O.G.[2]
[1] ORCID : 0000-0002-9871-011X;
[1, 2] Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, Tomsk, Russian Federation

* Corresponding author (grachevimces[at]gmail.com)

Abstract

The results of a comprehensive evaluation of the energy contained in the organic matter of the forest ecosystem of the southern taiga of Western Siberia are presented. On the example of the transeluvial section of the steep slope of the Ushayka River overflow terrace of the Tomsk district, the energy potentials of the vegetation and soil pools of the ecosystem were analysed, as well as their intrasystem differentiation. By means of field and laboratory studies on the basis of calculation of specific heat of combustion and determination of organic matter mass in one or another pool, the values of energy potentials were calculated for phytomass of grass cover, mortem mass, humus, non-humified organic matter of soils, surface and underground fractions of phytomass of common pine and birch bark. Very uneven distribution of energy in organic matter in the studied transeluvial transect area was established: about 68% of energy is concentrated in the phytomass of pine, 5% of energy is in the phytomass of birch, about 24% of energy is concentrated in the energy potential of soil, the rest of energy is distributed in smaller proportions in mortmass and grass cover. The study identified the dependence of energy parameters and their distribution on the orographic characteristics of the elementary landscape, calorific value of organic matter, its quantitative content in the study area, and the depth of occurrence of soil-forming rocks. Application of the methodological techniques used in this research will allow to obtain objective and detailed results in the component-by-component evaluation of not only natural but also anthropogenic ecosystems. The results of the research can be applied to solve problems of optimization and rationalization in agriculture, forest industry, for the purposes of monitoring of natural ecosystems, ecological forecasting.

Keywords: organic matter, forest ecosystem, energy approach, energy distribution, heat of combustion of matter, energy potential.

Введение

Функционирование любой экосистемы происходит в соответствии с формирующими ее потоками вещества и энергии, которые обуславливают разнообразие и динамику органического вещества, аккумулируемого в этой экосистеме. Исследование энергетических характеристик – показателей энергообмена между средой и экосистемой, количества затраченной энергии на образование и разрушение органического вещества, накопленной энергии в различных компонентах экосистемы, энергетических условий устойчивого существования экосистемы – актуально и связано с решением фундаментальных вопросов регуляции биогеохимических циклов. К настоящему времени разработаны методы энергетического анализа, позволяющие с различной степенью общности выявлять и количественно оценивать структуру, функционирование и состояние разнообразных экосистем и их компонентов [1], [18], [19], в том числе и созданных при участии человека – агроэкосистем [2], [8], [9], [14]. Тем не менее, несмотря на научную и практическую значимость таких исследований, ряд методологических и теоретических вопросов еще только поставлен, а методики нуждаются в совершенствовании. Одной из сложных проблем является комплексная оценка органического вещества в различных типах экосистем на разных уровнях пространственно-временной организации. И если для некоторых компонентов экосистем методическое обеспечение энергетического анализа трансформации органического вещества доведено до технологических приемов, то для других – методики энергетической оценки аккумулированного в них органического вещества схематичны.

Целью данного исследования является оценка количества энергии органического вещества в лесной экосистеме, выявление закономерностей его размещения в пулах растительности и почвы в условиях южной тайги Западной Сибири. В качестве интегрального показателя, позволяющего выявлять, оценивать и сравнивать направленность и интенсивность процессов динамики органического вещества как в каждом компоненте, так и в экосистеме в целом, авторы применяют понятие энергетического потенциала. Энергетический потенциал в данном случае представляет собой характеристику количества энергии, которое содержится в органическом веществе определенного компонента экосистемы. Предметом исследования являются энергопотенциалы пулов растений и почв элементарного ландшафта: гумуса, негумифицированного вещества почвы, мортмассы, травяного покрова, надземной и подземной фракций древесных растений.

Для проведения научных изысканий авторами был построен трансект на правом берегу реки Ушайка (Томский район). Трансект включает в себя 8 экосистем, представляющих собой элементарные ландшафты, типичные для данного района исследования. Это и участок поймы реки с луговой разнотравной растительностью, и элювиальные плакоры с сосново-березово-осиновым лесом, и трансаккумулятивные ландшафты надпойменной террасы. Объектом настоящего исследования является трансэлювиальный участок крутого склона надпойменной террасы реки Ушайка с сосновым лесом и березовым подростом со слабозакустаренным злаково-разнотравным травяным растительным покровом на серых лесных почвах.

Методы и принципы исследования

Район исследования располагается в условиях умеренно континентального климата и избыточного увлажнения. Площадь изучаемой территории составляет 73,9 м^2. Растительность представлена следующими видами: сосна обыкновенная (*Pinys sylvestris*), береза бородавчатая (*Betula pendula*), шиповник майский (*Rosa majalis Herrm.*), рябина сибирская (*Sorbus sibirica Hedl.*), спирея средняя (*Spiraea media Schmidt*), черемуха обыкновенная (*Padus avium Mill.*), вейник тростниковый (*Calamagrostis arundinacea (L.) Roth*), бор развесистый (*Milium effusum L.*), перловник поникающий (*Melica nutans L.*), осока большехвостая (*Carex macroura Meinsh.*), бедренец камнеломковый (*Pimpinella saxifraga L.*), борщевик рассеченный (*Heracleum dissectum Ledeb.*), василистник малый (*Thalictrum minus L.*), вероника дубравная (*Veronica chamaedrys L.*), герань двулистная (*Geranium bifolium Patrin ex DC.*), герань лесная (*Geranium sylvaticum L.*), горошек мышиный (*Vicia cracca L.*), горошек однопарный (*Vicia unijuga A. Braun*), девясил иволистный (*Inula salicina L.*), дудник лесной (*Angelica sylvestris L.*), земляника лесная (*Fragaria vesca L.*), золотарник обыкновенный (*Solidago virgaurea L.*), зопник клубненосный (*Phlomoides tuberose (L.) Moench*), клевер луговой (*Trifolium pratense L.*), клевер люпиновидный (*Trifolium lupinaster L.*), клопогон вонючий (*Cimicifuga foetida L.*), костяника (*Rubus saxatilis L.*), кровохлебка лекарственная (*Sanguisorba officinalis L.*), купена душистая (*Polygonatum odoratum (Mill.) Druce*), медуница мягкая (*Pulmonaria mollis Wulfen ex Hornem.*), орляк сосняковый (*Pteridium pinetorum C.N. Page et R.R. Mill*), подмаренник северный (*Galium boreale L.*), нивяник обыкновенный (*Leucanthemum vulgare Lam.*), реброплодник уральский (*Pleurospermum uralense Hoffm.*), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria L.*), тысячелистник недотрога (*Achillea impatiens L.*), фиалка одноцветковая (*Viola uniflora L.*), фиалка удивительная (*Viola mirabilis L.*), чина весенняя (*Lathyrus vernus (L.) Bernh.*), ястребинка зонтичная (*Hieracium umbellatum L.*). 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 проводились в соответствии с методикой проведения комплексных физико-географических исследований В.М. Жучковой [7]. Отбор образцов в рамках полевых исследований производился с пробной площадки размером 10×10 м^2, типичной для данного элементарного ландшафта. Определение массовой доли органического вещества травяного покрова и мортмассы осуществлялось на площади 1 м^2 посредством механического сбора, укоса трав и высушивания до абсолютно сухого состояния. Данные образцы высушивались при 105^{0}С и сжигались в лабораторных условиях в муффельной печи для определения зольности и потерь при прокаливании согласно ГОСТ Р 556661-2013 [4]. Определение теплоты сгорания проведено на калориметре типа АБК-1В согласно межгосударственным стандартам ГОСТ 33106-2014 [6]. Расчет энергии в органическом веществе травяного покрова E_f и мортмассы E_m производился согласно формулам 1 и 2:

$$E_f = q_f \times m_f \quad (1),$$

где E_f – энергопотенциал фитомассы травяного покрова, Дж/м^2; q_f – удельная теплота сгорания травяного покрова, Дж/кг; m_f – масса органического вещества травяного покрова на 1 м^2.

$$E_m = q_m \times m_m \quad (2),$$

где E_m – энергопотенциал мортмассы, Дж/м^2; q_m – удельная теплота сгорания мортмассы, МДж/кг; m_m – масса органического вещества мортмассы на 1 м^2.

Для исследования почв был произведен почвенный разрез, его описание, изъятие почвенного монолита. Отбор проб производился в трехкратной повторности для глубин, равным каждые 10 см относительно мощности гумусового горизонта. Далее, проводилось определение плотности почв в варианте Н.А. Качинского [7], взвешивание монолита, отбор растительных и корневых остатков, высушивание почвенных образцов при температуре 105^{0}С с дальнейшим повышением температуры в сушильном шкафу согласно ГОСТ 5180-84 [3]. В подготовленных образцах определялись запасы углерода и расчет гумуса посредством применения титриметрии, согласно методике И.В. Тюрина [10]. Для определения количества энергии в органическом веществе почв авторами применялась методика оценки энергопотенциала почв Н. П. Масютенко [11]. Расчет энергопотенциала органического вещества почв производился по формуле 3:

$$Q = Q_{\text{Г}} + Q_{\text{НВ}} \quad (3),$$

где Q – энергопотенциал органического вещества почвы, МДж/м^2; $Q_{\text{Г}}$ – запас энергии в гумусе, МДж/м^2; $Q_{\text{НВ}}$ – запасы энергии в негумифицированном органическом веществе почвы, МДж/м^2.

Отбор проб для определения энергетических запасов лесообразующих пород на исследуемом участке проводился посредством применения бурава Пресслера согласно полевым дендрохронологическим методам [13]. Образцы были проанализированы 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 в соответствии с ГОСТ 147-2013 [5], [15]. Абсолютная оценка органического вещества древесной растительности на практике вещь трудоемкая и практически недостижимая, так как подразумевает учет количественного и видового состава древесных пород, их разновозрастной состав, биотические и абиотические факторы произрастания и так далее. В данном исследовании были использованы аллометрические модели биомассы по В.А. Усольцеву, предназначенные для оценки запасов и годичного депонирования углерода [17]. Основанная на обработке большого количества материала, данная модель представляет собой функцию простой статической аллометрии, уравнение Беркута, которая после линеаризации путем логарифмирования имеет вид:

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln D \quad (4),$$

где P_i – биомасса *i*-й фракции (*Ps*, *Pb*, *Pf*, *Pa* – соответственно биомасса ствола, ветвей, листвы (хвои), надземная) в абсолютно сухом состоянии, кг; *D* – диаметр ствола на высоте груди, см.

Поскольку количественные пофракционные показатели P_i зависят от множества характеристик, были рассчитаны коэффициенты регрессии a_0 и a_1 для различных лесообразующих пород в зависимости от их возраста и условий произрастания [17]. Поскольку эколого-географические условия произрастания изучаемых древостоев отличаются от условий произрастания естественных древостоев Южного Урала незначительно, в дальнейшем исследовании применим коэффициенты регрессии для характеристик аллометрических уравнений по В.А. Усольцеву [16] (табл. 1):

Таблица 1 - Характеристики аллометрических уравнений

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.105.1

Порода	Описание	Фракция	Коэффициенты	
			a_0	a_1
Сосна обыкновенная *(P inus sylvestris L.)*	Южный Урал, естественные древостои	P_s	-3,3262	2,7131
		P_b	-4,5186	2,4074
		P_f	-4,1904	2,0384
		P_a	-2,8895	2,6219
Березы повислая (*Betula pendula Roth)* и пушистая (*Betula pubescens Ehrh.)*	Южный Урал, естественные древостои	P_s	-4,4833	3,2403
		P_b	-7,1801	3,4742
		P_f	-6,8814	2,8640
		P_a	-4,3367	3,2411

Относительные показатели массы корней определяются как отношение массы корней к надземной фитомассе [17]. Для сосны это соотношение равняется 0,19±0,04, а для березы 0,25±0,07.

Определение количества энергии органического вещества для лесообразующих пород было произведено по формулам 5, 6:

$$E_s = q_s \times (m_{su} + m_{sd}) = E_{su} + E_{sd} \quad (5),$$

где E_s – количество энергии органического вещества сосны обыкновенной, Дж; q_s – удельная теплота сгорания сосны, Дж/кг; m_{su} – масса надземной части органического вещества сосны, кг; m_{sd} – масса корней сосны, кг; E_{su} – количество энергии надземной фитомассы сосны, Дж; E_{sd} – количество энергии в корнях сосны, Дж.

$$E_b = q_b \times (m_{bu} + m_{bd}) = E_{bu} + E_{bd} \quad (6),$$

где E_b – количество энергии органического вещества березы бородавчатой, МДж; q_b – удельная теплота сгорания березы, Дж/кг; m_{bu} – масса надземной части органического вещества березы, кг; m_{bd} – масса корней березы, кг. E_{bu} – количество энергии надземной фитомассы березы, МДж; E_{bd} - количество энергии в корнях березы, Дж.

Таким образом, расчет текущего количества энергии органического вещества исследуемой экосистемы для площади 73,9 м^2 имеет следующий вид:

$$E_{\text{cur}} = E_f \times (S - S_f) + E_m \times (S - S_f) + Q_{\text{Г}} \times S + Q_{\text{НВ}} \times S + E_s + E_b \quad (7),$$

где E_{cur} – количество энергии в органическом веществе на пробной площади, Дж; E_f – количество энергии травяной растительности, Дж/м^2; S – площадь всего участка, м^2; S_f – площадь, занятая стволами лесных насаждений, м^2; E_m – количество энергии в мортмассе, Дж/м^2, $Q_Г$ – запас энергии в гумусе, Дж/м^2; $Q_{НВ}$ – запас энергии в негумифицированном веществе почвы, Дж/м^2, E_s – количество энергии органического вещества сосны обыкновенной, Дж; E_b – количество энергии органического вещества березы бородавчатой, Дж.

Основные результаты и обсуждение

После проведения укоса и сбора образцов травяной растительности, мортмассы на площадке размером 1 м^2 были получены следующие результаты: запас свежей травы составил 330,63 г, запас мортмассы 2465 г. По итогам высушивания до воздушно-сухого состояния эти показатели изменились до 190,52 г и 2040 г соответственно. Результаты лабораторных исследований определения потерь при прокаливании отображены в табл. 2:

Таблица 2 - Определение потерь при прокаливании

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.105.2

Образец	Вес золы, г	Навеска, г	Гигроскопическая влага, %	Выход золы, %
Травяной покров	0,1672	1,7396	6,9658	10,3312
Мортмасса	0,3178	2,4937	8,8227	13,9777

В результате определения зольности образцов установлено, что общий запас органического вещества травяной растительности на 1 м^2 равен 170,837 г, мортмассы – 1754,855 г. Согласно проведенным исследованиям на калориметре АБК-1В по определению теплоты сгорания, были получены следующие показатели удельной теплоты сгорания: для образцов травяного покрова – 18255,27 кДж/кг, мортмассы - 18568,22 кДж/кг. Таким образом, энергетический потенциал травяной фитомассы E_f составляет 3,119*10^6 Дж/м^2, энергетический потенциал мортмассы E_m – 32,585*10^6 Дж/м^2.

По итогам проведения почвенных исследований были получены следующие результаты: общий вес отобранного монолита составил 18675 г., вес корней в абсолютно сухом состоянии – 159,96 г., средние потери при сушке на монолит – 19,94%, высота монолита – 27 см, среднее значение плотности монолита составило d=1,316 т/м^3, общее содержание углерода – 1,66%, гумуса – 2,86%. Результаты определения содержания гумуса и углерода по методу И.В. Тюрина представлены на рис. 1.

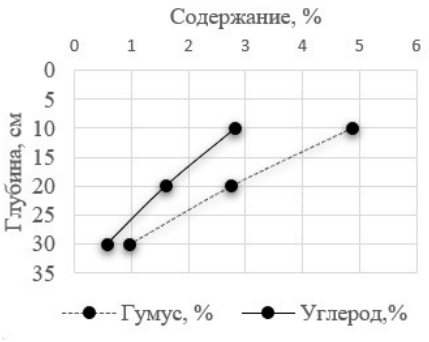


Рисунок 1 - Содержание углерода и гумуса в профиле почв

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.105.3

Согласно расчету установлено, что запасы энергии в гумусе $Q_Г$ составили 220,01*10^6 Дж/м^2 (16,259*10^9 Дж для всего участка). Содержание негумифицированного вещества *НВ* в почве определено как 38,014 т/га, запас энергии в негумифицированном веществе $Q_{НВ}$ – 71,62*10^6 Дж/м^2 (5,293*10^9 Дж для всего участка). Таким образом, совокупный энергопотенциал органического вещества почвы Q на исследуемом участке составляет 291,63*10^6 Дж/м^2 (21,552 *10^9 Дж для всего участка).

Из древесных насаждений на исследуемой пробной площадке произрастают 8 представителей сосны обыкновенной (средний возраст 87 лет, занимаемая стволами площадь 3,32 м^2) и 1 береза бородавчатая (средний возраст 41 год, занимаемая стволами площадь 0,03 м^2). Применение аллометрического моделирования по методу В.А.

Усольцева позволило получить следующие результаты: надземная фитомасса сосны обыкновенной m_{su} составляет 2802,92 кг, масса корней m_{sd}=532,56 кг; надземная фитомасса березы бородавчатой m_{bu}=205,16 кг, масса корней m_{bd}=51,29 кг.

Результаты исследований по определению и расчету удельной теплоты сгорания древесных образцов представлены в табл. 3:

Таблица 3 - Определение удельной теплоты сгорания образцов древесины

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.105.4

Показатель	Сосна	Береза
Внешняя влага топлива, %	1,3	-
Содержание влаги аналитической пробы, %	6,15	5,30
Влажность рабочая, общая, %	7,37	5,30
Зольность топлива, %	0,54	0,89
Зольность в сухом состоянии, %	0,57	0,94
Зольность рабочая, %	0,53	0,94
Среднее значение выхода летучих веществ в аналитической пробе, %	77,15	80,20
Выход летучих веществ в пересчете на горючую массу, %	82,68	85,49
Теплота сгорания низшая, рабочее состояние, кДж/кг	18457,89	18143,58

При определении количества энергии органического вещества для древесных насаждений (с учетом зольности в сухом состоянии) на площади 73,9 м^2 были получены следующие результаты: энергия надземной фитомассы сосны обыкновенной составляет E_{su}=51,441*10^9 МДж, энергия в корнях сосны – E_{sd}=9,774*10^9 МДж, энергия надземной фитомассы березы E_{bu}=3,687*10^9 МДж, энергия в корнях березы – E_{bd} =0,922*10^9 МДж.

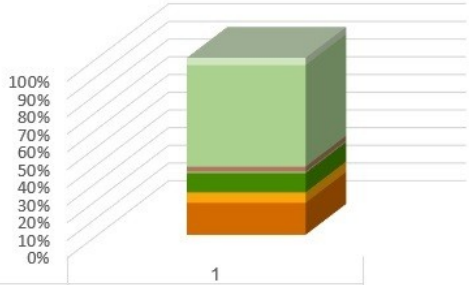
Используя полученные данные по энергетическим потенциалам исследуемых пулов, рассчитана комплексная оценка энергии, содержащейся в органическом веществе на площадке 73,9 м^2 на текущий момент времени, которая составляет E_{cur}=89,9*10^9 Дж. Полученные энергетические показатели представлены в табл. 4:

Таблица 4 - Энергетическая оценка органического вещества лесной экосистемы в условиях южной тайги Западной Сибири

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.105.5

Пул органического вещества	Энергопотенциал на всем участке, Дж
Фитомасса травяного покрова, E_f	220,045*10^6
Надземная фитомасса сосны обыкновенной, E_{su}	51,441*10^9
Корни сосны обыкновенной, E_{sd}	9,774*10^9
Надземная фитомасса березы бородавчатой, E_{bu}	3,687*10^9
Корни березы бородавчатой, E_{bd}	0,922*10^9
Мортмасса, E_m	2,3*10^9
Гумус в почве, $Q_Г$	16,259*10^9
Негумуфицированное органическое вещество почв, $Q_{НВ}$	5,293*10^9
Органическое вещество экосистемы на момент исследования, E_{cur}	89,9*10^9

Покомпонентное распределение энергетического потенциала органического вещества на исследуемом трансэлювиальном участке склона правой террасы реки Ушайка изображено на рис. 2:



	1
Энергия надземной фитомассы березы	4,10%
Энергия надземной фитомассы сосны	57,22%
Энергия фитомассы травяного покрова	0,24%
Энергия мортмассы	2,56%
Энергия в корнях березы	1,03%
Энергия в корнях сосны	10,87%
Энергия негумифицированного вещества почв	5,89%
Энергия гумуса	18,09%

Рисунок 2 - Распределение энергии в органическом веществе на исследуемом участке
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.105.6

Для определения закономерностей распространения энергии органического вещества необходимо отметить, что изучаемая площадь обладает небольшими размерами и расположена в пределах одного элементарного ландшафта. Как следствие, для неё характерны общие физико-географические условия: общая орография, количество поступающей солнечной энергии и выпадающих осадков, показатель крутизны склона (крутой склон 15-20º), общая почвообразующая порода, атмосферно-натечный тип увлажнения. Поэтому в таких небольших экосистемах можно детально дифференцировать энергопотенциалы исследуемых пулов и определить энергетическое влияние одного пула на другой.

Поскольку одним из этапов данного исследования являлось определение удельной теплоты сгорания, как составляющей расчета энергопотенциала, были выявлены некоторые особенности этой характеристики для того или иного пула экосистемы. Так, было установлено, что наибольшей теплотой сгорания обладает гумус почв – 21,65 МДж/кг [11], [12], а наименьшей – древесина березы (18,14 МДж/кг). Меньшие показатели удельной теплоты сгорания березы, по сравнению с травяным покровом (18,225 МДж/кг), объясняются видовым разнообразием злаково-разнотравной растительности экосистемы, в которой преобладают вейник тростниковый, бор развесистый, осока большехвостая, костяника и орляк сосняковый.

Следующим важным фактором распределения энергии в экосистеме является масса органического вещества в пуле, а также площадь его распространения. Согласно проведенным исследованиям, древесные насаждения занимают практически 33% изучаемой области, доминирующим видом является сосна обыкновенная. Из-за высоких показателей теплотворной способности, занимаемой площади, возраста и массы доля количества энергии пула сосны в данной экосистеме составляет порядка 68%, 10,87% из которых приходится на корневую систему. Травянистый покров, имея низкие показатели массы органического вещества и теплотворной способности, меньше всего (0,24%) участвует в распределении запасов энергии в исследуемой экосистеме.

Несмотря на небольшую мощность гумусового горизонта (содержание гумуса ≤1% на глубине 30 см), долгий период формирования почв на данной территории (порядка 6000 лет, согласно [20]), высокую крутизну склона (крутизна склона 15-20º), энергетический потенциал органического вещества почв занимает значительную часть, практически четверь, в распределении энергии органического вещества изучаемой экосистемы. Главными факторами здесь явились высокое содержание углерода в приповерхностном слое почв, относительно большой вес растительных и корневых остатков в высушенной почве, а также высокая теплотворная способность гумуса и негумифицированного вещества. Доля энергии гумуса почв в экосистеме составила 18,09%, а негумифицированного органического вещества 5,89%. Таким образом, энергопотенциал почв в совокупном энергопотенциале всей экосистемы составляет порядка 24%.

Стоит отметить значительное количество энергии в органическом веществе мортмассы исследуемого лесного участка. По теплоте сгорания мортмасса обладает достаточно средними значениями (18,568 МДж/кг), при этом, в ходе полевых работ с площади в 1м^2, были отобраны образцы мортмассы массой более 2 кг, что и оказало решающее влияние на увеличение удельной доли этого пула в энергопотенциале всей экосистемы. Высокая концентрация мортмассы объясняется главным образом геоморфологическими особенностями изучаемой территории. Данный элементарный ландшафт представляет собой крутой склон южной экспозиции, играющий важную роль в транспортировке и частичной аккумуляции вещества и энергии с элювиального сосново-березового ландшафта на трансаккумулятивный и аккумулятивные луговые ландшафты пойменной части реки Ушайка. Поскольку треть площади склона занята возрастными насаждениями сосны, а транспортировка вещества и энергии происходит

непосредственно с вышележащего на трансекте элювиального лесного ландшафта, то таким образом на подветренном склоне происходит аккумуляция большого количества опада и отпада сразу с нескольких элементарных ландшафтов.

Заключение

Полученные результаты изучения энергетических характеристик органического вещества для склона надпойменной террасы исследуемого трансекта подтверждают высокую информативность такого показателя как энергетический потенциал.

Детальный анализ энергетических потенциалов исследуемых пулов показал, что наибольшие значения этого показателя характерны для насаждений сосны обыкновенной, занимающей около 1/3 участка и составляют $51,441*10^9$ Дж в надземной фитомассе (57,22%) и $9,774*10^9$ Дж в корнях (10,87%). Среди древесных пород на исследуемой территории наименьшие значения приходятся на насаждения березы бородавчатой: $3,687*10^9$ Дж в надземной фитомассе (4,1%) и $0,922*10^9$ Дж в корнях (1,03%). На долю почвы приходится около 24% от всей энергии органического вещества, аккумулированного в экосистеме: в гумусе содержится $16,259*10^9$ Дж (18,09%), в негумифицированном органическом веществе $5,293*10^9$ Дж (5,89%). Высокими значениями характеризуется энергетический потенциал мортмассы – $2,3*10^9$ Дж, что составляет 2,56% от общего количества энергии. Минимальное значение энергии для исследуемых пулов определяется в разнотравно-луговой растительности – $220,045*10^6$ Дж (0,24%). На момент проведения исследований установлено, что все оцениваемое органического вещество данного участка обладает энергией равной $89,9*10^9$ Дж.

Выявлены и количественно подтверждены некоторые закономерности в распределении энергии органического вещества лесной экосистемы в условиях южной тайги Западной Сибири. Согласно проведенным исследованиям, энергетические показатели зависят от следующих характеристик: удельная теплота сгорания, масса органического вещества в пуле, площадь распространения пула, видовое разнообразие фитомассы, временя накопления органического вещества в пуле (возраст), геоморфологические особенностей элементарного ландшафта, мощность гумусового горизонта и запасов органического вещества в нем, а также плотность почв. Таким образом, изменение любой из вышеуказанных характеристик влечет за собой количественные изменения энергопотенциала в исследуемых пулах органического вещества, качественные изменения в распределении энергии в экосистеме. Так, например, вырубка насаждений сосны сократит запасы органического вещества на более чем 55%, что приведет к катастрофическим изменениям в экосистеме, к увеличению эрозии, к сокращению устойчивости ландшафта и дальнейшей его трансформации. С другой стороны, мероприятия по укреплению склонов деревьями с развитой корневой системой способны увеличить энергопотенциал кустарничково-травяного яруса, что приведет к увеличению биоразнообразия и сокращению эрозионных процессов на склонах.

Выполненные исследования позволили впервые дать энергетическую характеристику естественного трансэлювиального ландшафта южной тайги Западной Сибири. Посредством детальных полевых и лабораторных исследований был получен новый материал по комплексной энергетической оценке экосистемы. Дальнейшие исследования трансекта на правом побережье реки Ушайка в Томском районе позволят получить больше объективной информации о запасах и распределении энергии органического вещества в экосистемах зоны южной тайги Западной Сибири. Результаты исследований могут быть применены для целей мониторинга естественных экосистем, экологического прогнозирования, организации лесовосстановительных работ, разработке рекреационных зон и особо охраняемых природных территорий.

Финансирование

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научных тем: «Развитие системы мониторинга и комплексного анализа пулов и потоков парниковых газов болотных и лесных экосистем Западной Сибири», FWRG-2022-0001; «Динамические и эволюционные процессы в природных экосистемах Сибири: индикаторы, мониторинг, прогноз», FWRG-2021-0003.

Funding

The work was carried out with the state financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of scientific topics: "Development of a Monitoring System and Integrated Analysis of Pools and Fluxes of Greenhouse Gasses of Swamp and Forest Ecosystems of Western Siberia", FWRG-2022-0001; "Dynamic and Evolutionary Processes in Natural Ecosystems of Siberia: Indicators, Monitoring, Forecast", FWRG-2021-0003.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Безгубов В.А. К вопросу об экологической емкости территории и способам её оценки / В.А. Юезгубов, С.Н. Часовников // Фундаментальные исследования. — № 12. — 2015. — С. 751-754.

2. Володин В.М. Методические определения экологической емкости и биоэнергетического потенциала территории агроландшафта / В.М. Володин. — Курск: ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии. — 2000. — 32 с.

3. ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М.: Стандартинформ. 2005. — 19 с.

4. ГОСТ Р 55661-2013 Топливо твердое минеральное. Определение зольности. — М.: Стандартинформ. 2014. — 14 с.

5. ГОСТ 147-2013 (ISO 1928:2009) Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания. — М.: Стандартинформ. 2015.

6. ГОСТ 33106-2014 (EN 14918:2009) Биотопливо твердое. Определение теплоты сгорания. — М.: Стандартинформ. 2016. — 49 с.

7. Жучкова В.К. Методы комплексных физико-географических исследований. Учебное пособие для студентов ВУЗов / В.К. Жучкова, Э.М. Раковская. — М.: Академия. — 2004. — 368 с.

8. Кочуров Б.И. Энергетический подход к изучению геосистем и технологий лесовосстановления Приднестровья / Б.И. Кочуров, Н.А. Марунич // Юг России: экология, развитие. — 2016. — Т. 11. — №1(38). — С. 159–169. DOI:10.18470/1992-1098-2016-1-159-169

9. Кочуров Б.И. Эколого-энергетический анализ экосистем: монография / Б.И. Кочуров, Н.А. Марунич. — Москва: ИНФРА-М, 2018. — 144 с.

10. Мазиров М.А. Полевые исследования свойств почв: учебное пособие к полевой практике для студентов, обучающихся по направлению подготовки – почвоведение / М.А. Мазиров [и др.] // Влад. гос. ун-т. г. — Владимир: Изд-во ВлГУ, 2012. — 72 с.

11. Масютенко Н.П. Научные основы и методы оценки энергетического состояния почв в агроландшафтах / Н.П. Масютенко, В.В. Шеховцова, В.И. Шеховцов. — Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2004. — 60 с.

12. Масютенко Н.П. Методологические аспекты формирования экологически сбалансированных агроландшафтов / Н.П. Масютенко, В.А. Кузнецов, М.Н. Масютенко // Земледелие. — 2016. — № 7. — С. 5–9.

13. Матвеев С.М. Дендрохронология / С.М. Матвеев, Д.Е. Румянцев. — Воронеж: ВГЛТА, 2013. — 140 с.

14. Миндрин А.С. Энергоэкономическая оценка сельскохозяйственной продукции: Дис. … докт. экон. наук / А.С. Миндрин. — М: 1997. — 291 с.

15. Николаева В.И. Методы исследования свойств твердых топлив: учебное пособие / сост. В.И. Николаева, К.В. Буваков, Р.Б. Табакаев // Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. — 92 с.

16. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: исследование системы связей и закономерностей / В.А. Усольцев, Е.Л. Воробейчик, И.Е. Бергман. — Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. — 365 с.

17. Усольцев В.А. Аллометрические модели биомассы деревьев лесообразующих пород Урала / В.А. Усольцев, И.С. Цепордей, Д.В. Норицин // Леса России и хозяйство в них. — №1(80), 2022. — С. 4-14.

18. Фузелла Т.Ш. Энергетический подход к определению эффективности и оптимизации функционирования агроэкосистем (на примере СПК «Нелюбино»): Автореф. … дис. канд. геогр. наук / Т.Ш. Фузелла. — Томск, 2010. — 23 с.

19. Шуркина К.А. Анализ функционирования агроэкосистем с позиции энергетического подхода (на примере крестьянского хозяйства «СоМер-2»): Автореф. дис. … канд. геогр. наук / К.А. Шуркина. — М.: РГБ. 2009. — 23 с.

20. Gavrilov D.A. Holocene Soil Evolution in South Siberia Based on Phytolith Records and Genetic Soil Analysis (Russia) / D.A. Gavrilov, S.V. Loiko, N.V. Klimova // Geosciences. — no. 8(11). — 402. — p. 1–17.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bezgubov V.A. K voprosu ob jekologicheskoj emkosti territorii i sposobam ejo ocenki [To the Question of Ecological Capacity of the Territory and Methods of its Assessment] / V.A. Yuezgubov, S.N. Chasovnikov // Fundamental'nye issledovanija [Fundamental Research]. — no. 12. — p. 751-754. [in Russian]

2. Volodin V.M. Metodicheskie opredelenija jekologicheskoj emkosti i biojenergeticheskogo potenciala territorii agrolandshafta [Methodical Definitions of Ecological Capacity and Bioenergy Potential of Agrolandscape Territory] / V.M. Volodin. — Kursk: All-Russian Research Institute of Agriculture and Soil Erosion Protection. 2000. — 32 p. [in Russian]

3. GOST 5180-84. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik [State Standard 5180-84 Soils. Laboratory Methods for Determination of Physical Characteristics]. — Moscow. Standartinform Publ. 2005. —19 p. [in Russian]

4. GOST R 55661-2013 Toplivo tverdoe mineral'noe. Opredelenie zol'nosti [State Standard R 55661-2013 Solid Mineral Fuel. Ultimate Analysis]. — Moscow. Standartinform Publ. 2014. — 14 p. [in Russian]

5. GOST 147-2013 (ISO 1928:2009) Toplivo tverdoe mineral'noe. Opredelenie vysshej teploty sgoranija i raschet nizshej teploty sgoranija. [State Standard 147-2013 (ISO 1928:2009) Solid Mineral Fuel. Determination of Gross Calorific Value and Calculation of Net Calorific Value]. — Moscow, Standartinform. Publ 2015. [in Russian].

6. GOST 33106-2014 (EN 14918:2009) Biotoplivo tverdoe. Opredelenie teploty sgoraniya [State Standard 33106-2014 (EN 14918:2009) Solid Biofuel. Determination of Calorific Value]. — Moscow, Standartinform Publ. 2016. — 49 p. [in Russian].

7. Zhuchkova V.K.Metody kompleksnykh fiziko-geograficheskikh issledovaniy. Uchebnoe posobie dlya studentov VUZov [Methods of Complex Physical and Geographical Research: Textbook] / V.K. Zhuchkova, E.M. Rakovskaya. — Moscow: Academia Publ. [in Russian]

8. Kochurov B.I. Energeticheskij podhod k izucheniyu geosistem i tekhnologij lesovosstanovleniya Pridnestrov'ya [Energy Approach in the Study of Geosystems and Technologies of Reforestation in Transnistria] / B.I. Kochurov, N.A. Marunich //

YUg Rossii: ekologiya, razvitie [South of Russia: Ecology, Development]. — 2016. — vol. 11. — no. 1. — p. 159–169. DOI:10.18470/1992-1098-2016-1-159-169 [in Russian]

9. Kochurov B.I. Ekologo-energeticheskiy analiz ekosistem [Ecological and Energy Analysis of Ecosystems] / B.I. Kochurov, N.A. Marunich. — Moscow: INFRA-M Publ., 2018. — 144 p. [in Russian]

10. Mazirov M.A. Polevye issledovaniya svoystv pochv: uchebnoe posobie k polevoy praktike dlya studentov, obuchayushchikhsya po napravleniyu podgotovki – pochvovedenie [Field Studies of Soil Properties: Textbook] / M.A. Mazirov [et al.] // Vladimir State University. — Vladimir: Vladimir State University Publ., 2012. — 72 p. [in Russian]

11. Masyutenko N.P. Nauchnye osnovy i metody otsenki energeticheskogo sostoyaniya pochv v agrolandshaftakh [Scientific Foundations and Methods for Assessing the Energy State of Soils in Agricultural Landscapes] / N.P. Masyutenko, V.V. Shkhotsova, V.I. Shekhovtsov. — Kursk: VNIIZIZIZPE, 2004. — 60 p. [in Russian]

12. Masjutenko N.P. Metodologicheskie aspekty formirovanija jekologicheski sbalansirovannyh agrolandshaftov [Methodological Aspects of Formation of Ecologically Balanced Agrolandscapes] / N.P. Masjutenko, V.A. Kuznevov, M.N. Masjutenko // Zemledelie [Land Farming]. — 2016. — no. 7. — p. 5–9. [in Russian]

13. Matveev S.M. Dendrohronologija [Dendrochronology] / S.M. Matveev, D.E. Rumjancev. — Voronezh: VSLTA, 2013. — 140 p. [in Russian]

14. Mindrin A.S. Energoekonomicheskaya otsenka sel'skokhozyaystvennoy produktsii [Energy Economic Assessment of Agricultural Products] Extended Abstract of Doctoral (Econom.) Dissertation / A.S. Mindrin. — Moscow. RSL Publ. 1997. — 291 p. [in Russian]

15. Nikolaeva V.I. Metody issledovanija svojstv tverdyh topliv: uchebnoe posobie [Methods of Solid Fuels Properties Research: textbook] / comp. by V.I. Nikolaeeva, K.V. Buvakov, R.B. Tabakaev // Tomsk Polytechnic University. — Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House., 2013. — 92 p. [in Russian]

16. Usol'cev V.A. Biologicheskaja produktivnost' lesov Urala v uslovijah tehnogennogo zagrjaznenija: issledovanie sistemy svjazej i zakonomernostej [Biological Productivity of Ural Forests in the Conditions of Technogenic Pollution: Study of the System of Relationships and Regularities] / V.A. Usoltsev, E.L. Vorobeychik, I.E. Bergman. — Yekaterinburg: USLTU. [in Russian]

17. Usol'cev V.A. Allometricheskie modeli biomassy derev'ev lesoobrazujushhih porod Urala [Allometric Models of Biomass of Trees of Forest-Building Species of the Urals] / V.A. Usoltsev, I.S. Tsepordey, D.V. Noritsin // Lesa Rossii i hozjajstvo v nih [Forests of Russia and Management in Them]. — no. 1(80). — p. 4-14. [in Russian]

18. Fuzella T.Sh. Energeticheskiy podkhod k opredeleniyu effektivnosti i optimizatsii funktsionirovaniya agroekosistem (na primere SPK «Nelyubino») [Energy Approach to Determining the Efficiency and Optimization of the Functioning of Agroecosystems (using the example of «Nelyubino»)] Extended Abstract of Doctoral (Geography) Dissertation / T.Sh. Fuzella. — Tomsk, 2010. — 23 p. [in Russian]

19. Shurkina K.A. Analiz funktsionirovaniya agroekosistem s pozitsii energeticheskogo podkhoda (na primere krest'yanskogo khozyaystva «SoMer-2») [Analysis of the Functioning of Agroecosystems from the Perspective of the Energy Approach (on the example of the peasant farm «SoMer-2»)] Extended Abstract of Doctoral (Geography) Dissertation / K.A. Shurkina. — Moscow: RSL Publ. 2009. — 23 p. [in Russian]

20. Gavrilov D.A. Holocene Soil Evolution in South Siberia Based on Phytolith Records and Genetic Soil Analysis (Russia) / D.A. Gavrilov, S.V. Loiko, N.V. Klimova // Geosciences. — no. 8(11). — 402. — p. 1–17.