

Термодинамический подход к спутниковому картированию накопленного экологического ущерба лесных экосистем

В. И. Горный, А. В. Киселев, С. Г. Крицук, И. Ш. Латыпов, А. А. Тронин

Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

На основе теоретических положений термодинамики лесных экосистем показано, что мерой их здоровья может считаться скорость испарения влаги с поверхности лесного покрова. Для расчёта накопленного экологического ущерба лесных экосистем введён показатель накопленного экологического вреда как отношение декремента скорости испарения, обусловленного воздействием на лес, к скорости испарения здоровой лесной экосистемы. Накопленный экологический ущерб представлен как произведение показателя накопленного экологического вреда и стоимости экосистем. Рассмотрено два подхода к выбору здоровой экосистемы: статистический и на особо охраняемых природных территориях. В качестве исходных материалов для картирования накопленного экологического ущерба использованы карта скорости испарения (стандартный глобальный восьмидневный продукт NASA) и карта растительности России (стандартный продукт Института космических исследований РАН и Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН). В результате построена карта удельного накопленного экологического ущерба Ленинградской области, с помощью которой выполнено ранжирование административных районов области по среднему по району удельному накопленному экологическому ущербу. Оценён полный накопленный экологический ущерб всех лесов Ленинградской области. Сделаны заключения о необходимости детальной верификации разработанной методологии и перспективах автоматизации процесса спутникового картирования накопленного экологического ущерба лесных экосистем.

Ключевые слова: лесная экосистема, термодинамика, воздействие, реакция, вред, спутник, дистанционное зондирование, картирование, накопленный экологический ущерб

Одобрена к печати: 22.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-124-136

Введение

Под накопленным экологическим ущербом (НЭУ) понимается выраженный в денежном выражении вред, причинённый окружающей среде в результате осуществления хозяйственной и иной деятельности, а также затраты на ликвидацию и предотвращение этого вреда (Об утверждении..., 2012). Ясно, что затраты на восстановление повреждённой лесной экосистемы (ЛЭС) могут сильно варьировать в зависимости от вида экологического вреда, удалённости от дорожной сети, требуемых сроков ликвидации ущерба. В ряде случаев затраты на восстановление ЛЭС могут превысить собственно нанесённый ей вред, выраженный в денежном выражении. Поэтому целесообразно разделить эти два ущерба и на первом этапе оценки НЭУ рассматривать только снижение стоимостного выражения ЛЭС (рыночной стоимости), возникающего в результате накопления экологического вреда.

Известные методики оценки НЭУ базируются в основном на микроскопическом методологическом подходе, когда требуется выполнить трудоёмкий объём работ по выявлению каждого объекта экологического вреда с последующей экспертной (всегда субъективной) оценкой значимости его воздействия на здоровье ЛЭС (Об утверждении..., 2012). При этом затраты могут быть значительными. Учитывая гигантскую территорию России, целесообразно задачу оценки НЭУ решать с максимальным привлечением измерительных методов дистанционного зондирования Земли из космоса.

Существует множество примеров применения материалов дистанционного зондирования для картирования прошлого экологического вреда, нанесённого ЛЭС антропогенным воз-

действием. В частности, вычисление индекса нарушенности (DI — disturbance index) (Crist, Cicone, 1984; Masek et al., 2008), рассчитываемого по материалам спутниковой съёмки много-спектральными съёмочными системами (например, LandSat), термодинамического индекса нарушенности ЭС (Горный и др., 2011), нормализованного дифференциального вегетационного индекса (Калабин и др., 2010, 2013, 2014, 2016, 2018; Крицук и др., 2013). В то же время проблема спутникового картирования именно НЭУ находится в самом начале её решения.

В связи с этим целью настоящей статьи является разработка макроскопического (феноменологического) методологического подхода к спутниковому картированию НЭУ, базирующегося на регистрации реакции ЛЭС на антропогенные и природные воздействия.

Теоретическое обоснование возможности спутникового картирования НЭУ

Определено, что обобщённым термодинамическим показателем, характеризующим деградацию ЛЭС в результате внешнего воздействия, является удельное приращение энтропии $\sigma(\tau)$ на единицу площади ЛЭС ($\text{Дж}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$) за данный промежуток времени $\Delta\tau$ (сут) (Jorgensen, Svirezhev, 2004):

$$\sigma(\tau) = [S(\tau_o + \Delta\tau) - S(\tau_o)] = \frac{1}{T} [W + \Delta\tau(P_o - P)], \quad (1)$$

где $S = Q/T$ — удельная энтропия ($\text{Дж}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$), характеризующая степень хаоса в единице площади ЛЭС; Q — количество тепла, получаемого единицей площади ЛЭС из окружающей среды (ОС) или отдаваемого в ОС ($\text{Дж}/\text{м}^2$); T — средняя абсолютная температура ЛЭС (К) за время воздействия $\Delta\tau$ (сут); τ и τ_o — текущее время и момент начала воздействия на ЛЭС (сут); W — удельная полная (физическая и химическая) нагрузка на единицу площади ЛЭС за время воздействия ($\text{Дж}/\text{м}^2$); P — средняя за время воздействия удельная продуктивность единицы площади нарушенной ЛЭС, выраженная в энергетических единицах ($\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$), характеризует долю поглощённой ЛЭС солнечной энергии, расходуемую на депонирование углерода; P_o — средняя за время воздействия удельная продуктивность единицы площади здоровой (фоновой) ЛЭС ($\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$).

Из выражения (1) следует, что чем система более упорядочена, тем ниже её энтропия. Живая биомасса характеризуется высокой упорядоченностью и, соответственно, низкой энтропией. По сравнению с живой биомассой детрит менее упорядочен и характеризуется большим хаосом и, соответственно, большей энтропией.

Ключевым моментом является то, что в соответствии с уравнением (1) антропогенное воздействие приводит к дополнительной генерации энтропии в ЛЭС. В то же время ЛЭС является открытой системой, и растительность, поглощая солнечную энергию, расходует её на снижение (откачку) энтропии из ЛЭС (так называемый энтропийный насос по Дж. С. Йоргенсену и Ю. М. Свирежеву (Jorgensen, Svirezhev, 2004)). Отсюда следует, что чем выше нагрузка на ЭС, тем большая доля поглощённой растительностью солнечной энергии расходуется на вывод энтропии из ЛЭС и тем меньшая её доля используется для прироста биомассы (для депонирования углерода). Иными словами, при прочих равных условиях тем большее количество солнечной энергии должно затрачиваться на восстановление порядка в ЛЭС и тем меньше должна быть скорость прироста её биомассы, т. е. снижается продуктивность ЛЭС.

Рассмотрим случай, когда ЛЭС подверглась незначительному по интенсивности воздействию. При этом она не потеряла ранее сформированную биомассу, что соответствует малому отклонению ЛЭС от состояния термодинамического равновесия с окружающей средой. При этих условиях будем считать, что реакция ЛЭС на воздействие линейна, т. е. малому значению воздействия на ЛЭС соответствует малое же отклонение ЛЭС от термодинамического равновесия. Этот случай наиболее интересен в прикладном плане. Ведь если ЛЭС длительное время подвергалась интенсивному антропогенному воздействию, что привело к отмиранию

биомассы, то это можно заметить и оценить существующими дистанционными методами, например построением карт нормализованного дифференциального вегетационного индекса.

Дополнительно предположим, что ЛЭС находится в установившемся состоянии, т. е. вся продуцируемая в ней энтропия выводится в окружающую среду в течение годового вегетационного цикла: $\sigma = \int_{\tau=0}^{\tau=\text{год}} S(\tau) d\tau = 0$. Это означает, что вся энтропия, образовавшаяся в ЛЭС

в течение года, была выведена («энтропийный насос») из неё за счёт расходования поглощённой солнечной энергии. Тогда уравнение (1) может быть приведено к виду (Jorgensen, Svirezhev, 2004):

$$W = \Delta\tau(P_o - P). \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что изменение годовой продуктивности ЛЭС определяется уровнем воздействия на неё. Поэтому если определить продуктивность ЛЭС, то можно будет судить об уровне полного воздействия, которому она подверглась.

Продуктивность ЛЭС (P) может быть оценена исходя из массы воды (m_c), которую необходимо испарить растению для депонирования единичной массы углерода: m_c равна 879 кг воды на 1 кг углерода (Jorgensen, Svirezhev, 2004); тогда:

$$P = Em_c.$$

Так как m_c — величина постоянная, то E — удельная скорость испарения влаги с поверхности ЛЭС ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$) — может рассматриваться как мера внешнего воздействия на неё. На этом основании введём D — показатель экологического вреда, нанесённого ЛЭС воздействием:

$$D = \frac{\hat{E}_o - \hat{E}}{\hat{E}_o} = \left(1 - \frac{\hat{E}}{\hat{E}_o}\right) = (1 - \text{EQR}), \quad (3)$$

где \hat{E}_o и \hat{E} — удельные скорости испарения влаги с единицы площади соответственно здоровой и нарушенной ЛЭС в период максимума годовой вегетации; $\text{EQR} = \hat{E}/\hat{E}_o$ — коэффициент экологического качества (Ecological Quality Ratio), принятый в Европейском Союзе (van de Bund, Solimini, 2007). Из уравнения (3) следует, что показатель экологического вреда есть отношение декремента удельной скорости испарения, вызванного нагрузкой на ЛЭС, к удельной скорости испарения здоровой (фоновой, референсной) ЛЭС, т. е. такой же ЛЭС, но не подвергавшейся внешнему воздействию. Индекс EQR — отношение значения измеренной характеристики ЛЭС к этой же характеристике фоновой ЛЭС. Во многих случаях для анализа EQR используются экспертные оценки (van de Bund, Solimini, 2007). Так как существуют корректные методы спутникового картирования скорости испарения (Mu et al., 2011; Running et al., 2017), становится возможным переход на количественный (измерительный) уровень картирования и отказ от субъективных экспертных оценок. Таким образом, показатель экологического вреда (3), выведенный нами на основе теории термодинамики ЛЭС, не противоречит общему принципу оценки состояния лесной экосистемы, принятому в Европейском Союзе.

Из уравнения (3) следует, что чем сильнее ЛЭС нарушена внешним (антропогенным или природным) воздействием, тем D ближе к единице. Знание D позволяет перейти к расчёту снижения стоимости нарушенной ЛЭС (по отношению к здоровой), вызванного антропогенным воздействием за всё время её существования, т. е. НЭУ в том понимании, которое сформулировано нами выше. Для этого положим, что V_o^j — удельная стоимость единицы площади здоровой (фоновой) ЛЭС ($\text{руб.}/\text{км}^2$) (j указывает на вид ЛЭС: например, $j = 1$ соответствует ЛЭС темнохвойных лесов). При этом условии L^j — удельный накопленный экологический ущерб ($\text{руб.}/\text{км}^2$) — может быть представлен в виде:

$$L^j = D^j V_o^j. \quad (4)$$

Выражение (4) является основой для разработки методики картирования удельного НЭУ (УНЭУ), т. е. плотности НЭУ на единицу площади.

Для реализации теоретических предпосылок возможности картирования УНЭУ на основе выражения (4) необходимо иметь карту ЛЭС и карту скорости испарения влаги. В пределах каждой лесной экосистемы нужно в соответствии с уравнением (3) выделить фоновую (здоровую) ЛЭС и рассчитать D — показатель нарушенности ЛЭС. Далее для каждой ЛЭС из таблиц необходимо выбрать V_o^j — стоимость единицы площади здоровой (фоновой) лесной экосистемы — и рассчитать L^j — УНЭУ для каждой ЛЭС. После чего все частные карты УНЭУ, построенные для каждой ЛЭС, сводятся («сшиваются») в единую карту.

Материалы и методы

Для реализации теоретически обоснованной феноменологической методологии дистанционного картирования УНЭУ в качестве объекта исследования были выбраны ЛЭС Ленинградской области, расположенной в подзонах средней и южной тайги.

В соответствии с уравнением (3) для картирования УНЭУ по выражению (4) необходимо построить карту скорости испарения влаги с поверхности ЛЭС. Для построения такой карты в период максимума фенофазы возможны два подхода:

1. Метод, основанный на теплоинерционном подходе, применённом нами для построения карт теплофизических свойств поверхности городской среды (Горный, 2004; Горный и др., 2017). Для его реализации необходимо выполнить многократную тепловую космическую съёмку в условиях стабильно безоблачной погоды. Достоинством метода является малое количество предположений при его реализации и возможность построения карт скорости испарения с разрешением в 1 км на основе результатов тепловых космических съёмок, выполненных спутниками Terra/Aqua(MODIS), или с разрешением примерно в 100 м на основе комплексирования результатов съёмки спутниками Terra/Aqua(MODIS) и LandSat (Крицук и др., 2016). Недостатком метода является его трудоёмкость и сложность производственного внедрения этой технологии.
2. Метод NASA (Mu et al., 2011, 2013; Running et al., 2017), основанный на использовании результатов дневной тепловой космической съёмки спутником Terra(MODIS) и карт нормализованного дифференциального вегетационного индекса (метод temperature-vegetation). В свободном доступе распространяется восьмидневный стандартный продукт MOD16A2 на всю территорию суши, подготавливаемый в рамках проекта NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Преимуществом метода является общедоступность материалов на любую территорию и лёгкость внедрения в практику.

В данной работе нами использованы карты скорости испарения, подготовленные по проекту NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Карта скорости испарения территории Ленинградской области приведена на *рис. 1а* (см. с. 128).

Для расчёта УНЭУ каждой из типов ЛЭС была использована карта растительности России TerraNorte RLS (Барталев и др., 2011), подготовленная в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) и Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН) (*рис. 1б*). Достоинством этой карты является то, что она выпускается в цифровом виде, общедоступна, обновляется каждые два года и подготавливается по материалам съёмок спутниками Terra/Aqua (MODIS), выполняемым с геометрическим разрешением на местности 250 м. Такое разрешение достаточно для расчёта УНЭУ лесных ЛЭС Ленинградской области.

В процессе исследований не удалось найти для Ленинградской области оценки стоимости ЛЭС, учитывающие все блага, которые получает общество от леса. Поэтому в качестве паллиатива для демонстрации расчёта УНЭУ по формуле (5) были использованы конкретные значения стоимости ЛЭС (*табл. 1*), полученные для Свердловской области (Лебедев, 2015)

и апробированные также в республике Коми. В указанной выше работе удельная стоимость лесной экосистемы рассчитана как разность между суммарным потенциальным экономическим эффектом от всех лесных благ: древесины, средоформирующих функций, поддержания состава атмосферы, социальных функций лесов (рекреационной, оздоровительной, эстетической) — и расходами лесного хозяйства на воспроизводство, охрану и защиту лесов.

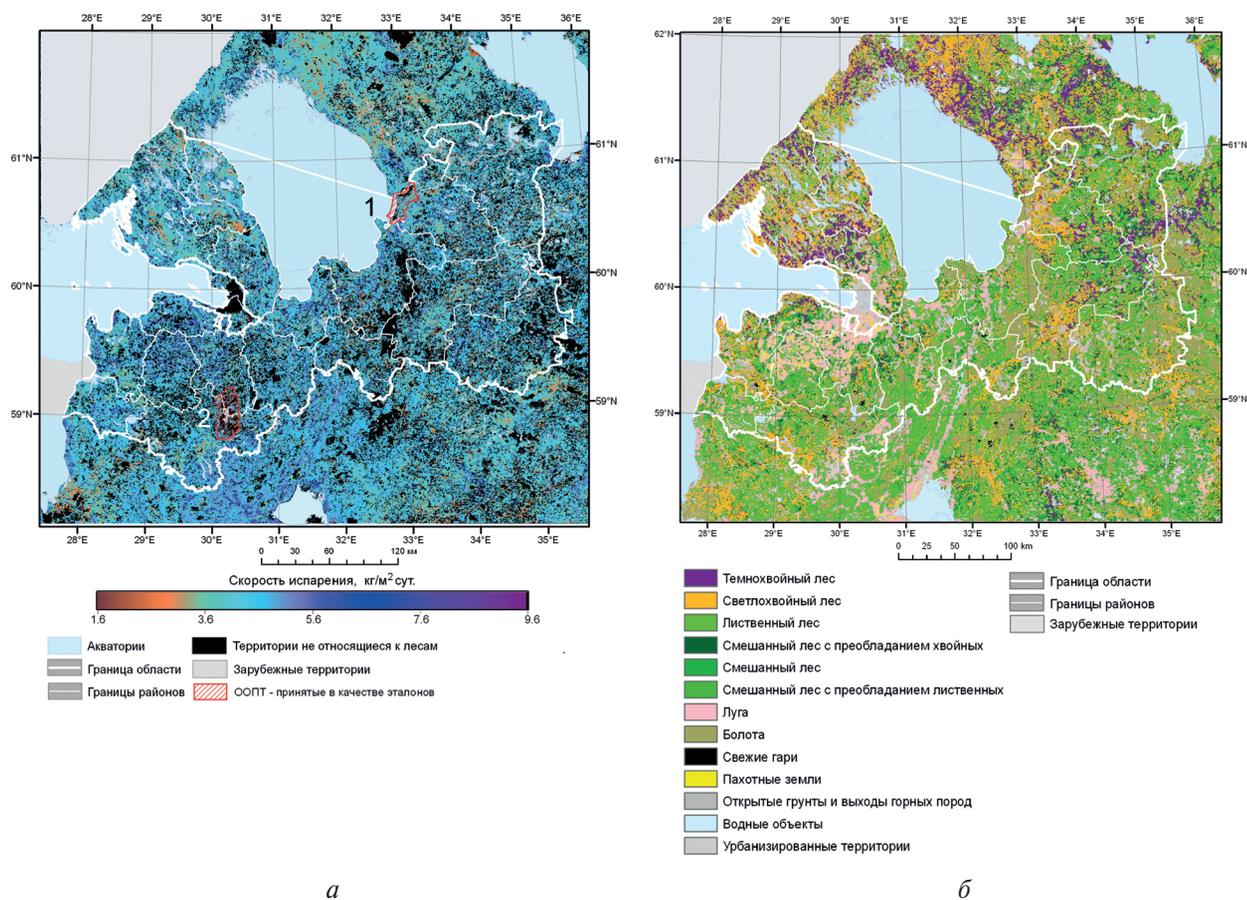


Рис. 1. Карта скорости испарения с земной поверхности территории Ленинградской области, подготовленная по результатам спутниковых съёмок в рамках проекта NASA EOSDIS Land Processes DAAC (03.07.2012) (а); ООПТ: 1 — Нижне-Свирский государственный природный заповедник, 2 — Федеральный комплексный заказник «Мшинское болото». Фрагмент карты растительности России TerraNorte RLS (Барталев и др., 2011) на территорию Ленинградской области (б)

Для определения \hat{E}_o^j — значения удельной скорости испарения влаги с поверхности здоровой (фоновой) ЛЭС, необходимого при картировании УНЭУ, — было опробовано два метода:

1. В пределах всей картируемой территории вычислялись \bar{E}^j — средние для ЛЭС каждого вида значения — и стандартные отклонения σ этого распределения. При этом выполнялось условие: $\hat{E}_o^j = \bar{E}^j + 3\sigma$.
2. В качестве здоровых выбирались ЛЭС особо охраняемых природных территорий (ООПТ): $\hat{E}_o^j = \bar{E}_R^j$, где: \bar{E}_R^j — среднее значение удельной скорости испарения данной ЛЭС в ООПТ. Для реализации этого подхода на территории Ленинградской области были выбраны две ООПТ: Нижне-Свирский государственный природный заповедник и Федеральный комплексный заказник «Мшинское болото» (см. рис. 1а).

На основе описанных подходов были подготовлены две карты УНЭУ ЛЭС Ленинградской области.

Таблица 1. Комплексная (эколого-экономическая) стоимость лесов* (Лебедев, 2015)

Тип леса	Доля породного состава, %	Стоимость, тыс. руб./га
Темнохвойный	100	117,0
Светлохвойный	100	138,0
Лиственный	100	82,5
Смешанный с преобладанием хвойных	сосна — 35 ель — 35 лиственные — 30	114,0
Смешанный	сосна — 25 ель — 25 лиственные — 50	105,0
Смешанный с преобладанием лиственных	сосна — 15 ель — 15 лиственные — 70	95,6

Результаты спутникового картирования УНЭУ ЛЭС Ленинградской области

На *рис. 2* приведена карта УНЭУ ЛЭС, построенная путём выбора в качестве здоровых (фоновых) лесных экосистем в ООПТ. Спутниковое картирование УНЭУ позволило ранжировать районы Ленинградской области по среднему по району УНЭУ (*рис. 3*, см. с. 130, *табл. 2*).

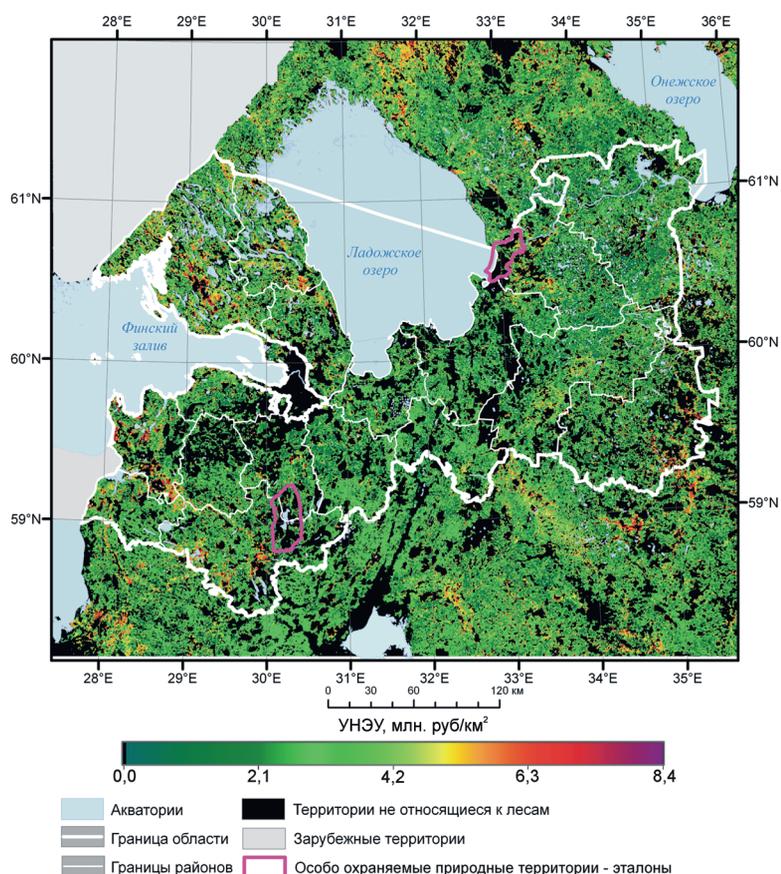


Рис. 2. Карта УНЭУ лесных ЛЭС Ленинградской области, подготовленная по результатам спутниковых съёмок

* Для смешанных лесов стоимость пересчитана в соответствии с указанным в работе (Барталев и др., 2011) породным составом.

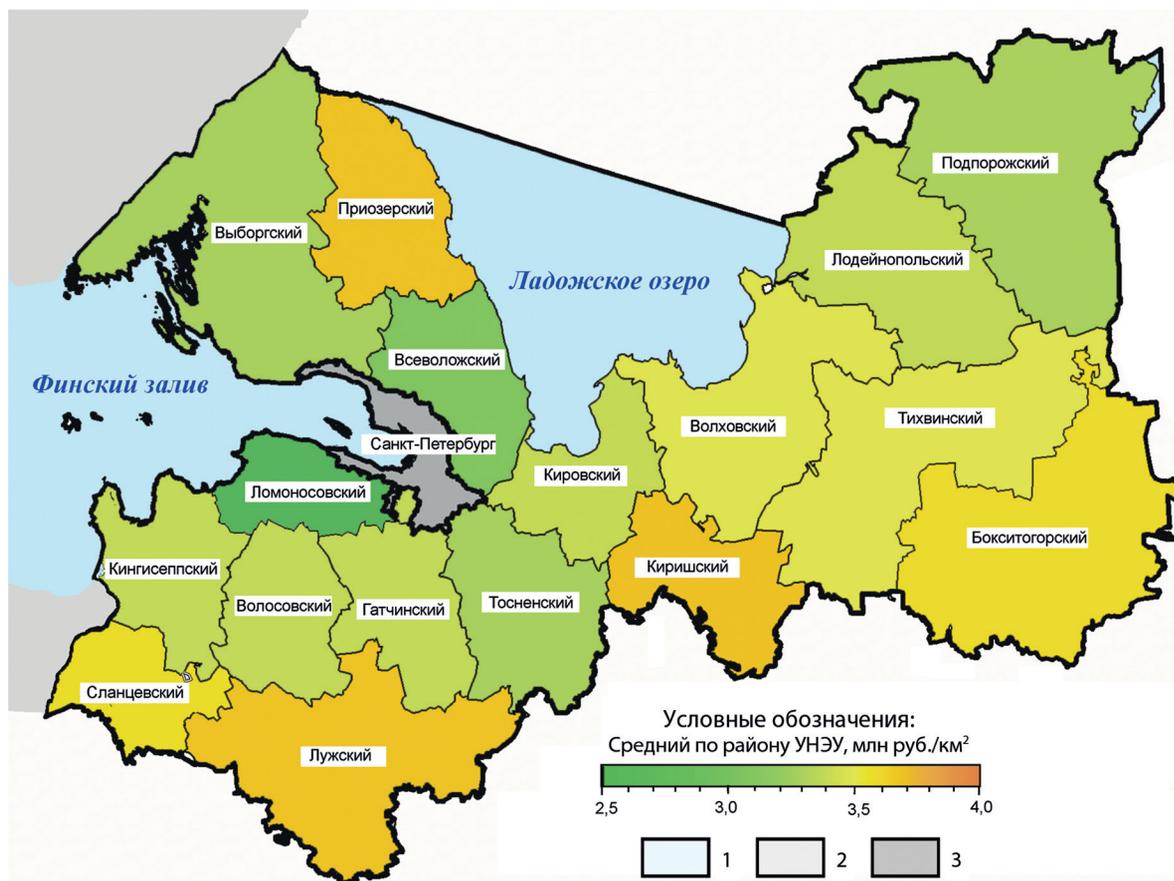


Рис. 3. Картограмма ранжирования административных районов Ленинградской области по среднему по району УНЭУ ЛЭС: 1 — акватории; 2 — зарубежные территории; 3 — урбанизированные территории

Таблица 2. Результаты оценки УНЭУ и НЭУ по районам Ленинградской области

Район	Средний по площади ЛЭС района УНЭУ, млн руб./км ²	Площадь лесов в районе, км ²	НЭУ ЛЭС в районе, млрд руб.
Бокситогорский	3,6	3319	47,7
Волосовский	3,4	1051	14,4
Волховский	3,5	2353	33,3
Всеволожский	3,1	1645	20,1
Выборгский	3,3	4652	61,7
Гатчинский	3,4	960	12,9
Кингисеппский	3,4	1569	21,5
Киришский	3,7	1392	20,5
Кировский	3,4	1362	18,3
Лодейнопольский	3,4	2952	39,7
Ломоносовский	2,5	882	8,8
Лужский	3,7	2839	41,6
Подпорожский	3,3	4627	61,2
Приозерский	3,7	2155	32,2
Сланцевский	3,6	1317	19,1
Тихвинский	3,5	3645	51,2
Тосненский	3,3	1844	24,1

Наибольший средний по району УНЭУ, равный 3,7 млн руб., отмечен в Кировском, Лужском и Приозерском районах. В то же время наибольший НЭУ (см. табл. 2) отмечен в Выборгском (61,7 млрд руб.) и Подпорожском районах (61,2 млрд руб.), характеризующихся наибольшими площадями ЛЭС. Отчётливо прослеживается связь НЭУ с площадью, которую занимают леса в районе (см. рис. 3 и табл. 2). Это следствие того, что диапазон средних по районам УНЭУ лежит в пределах 2,5–3,7 млн руб./км², т.е. разброс не превышает 33%. В целом НЭУ для ЛЭС Ленинградской области по спутниковому картированию (суммарный по всем административным районам) оценён в 527 млрд руб.

Обсуждение результатов

Предварительный анализ карты УНЭУ (см. рис. 2) показал, что высокие значения УНЭУ соответствуют различным антропогенным воздействиям (рис. 4). Прежде всего, высокими значениями отмечаются свежие вырубki (1 на рис. 4) и площади влияния карьеров для добычи щебёнки на Карельском перешейке (2 на рис. 4).

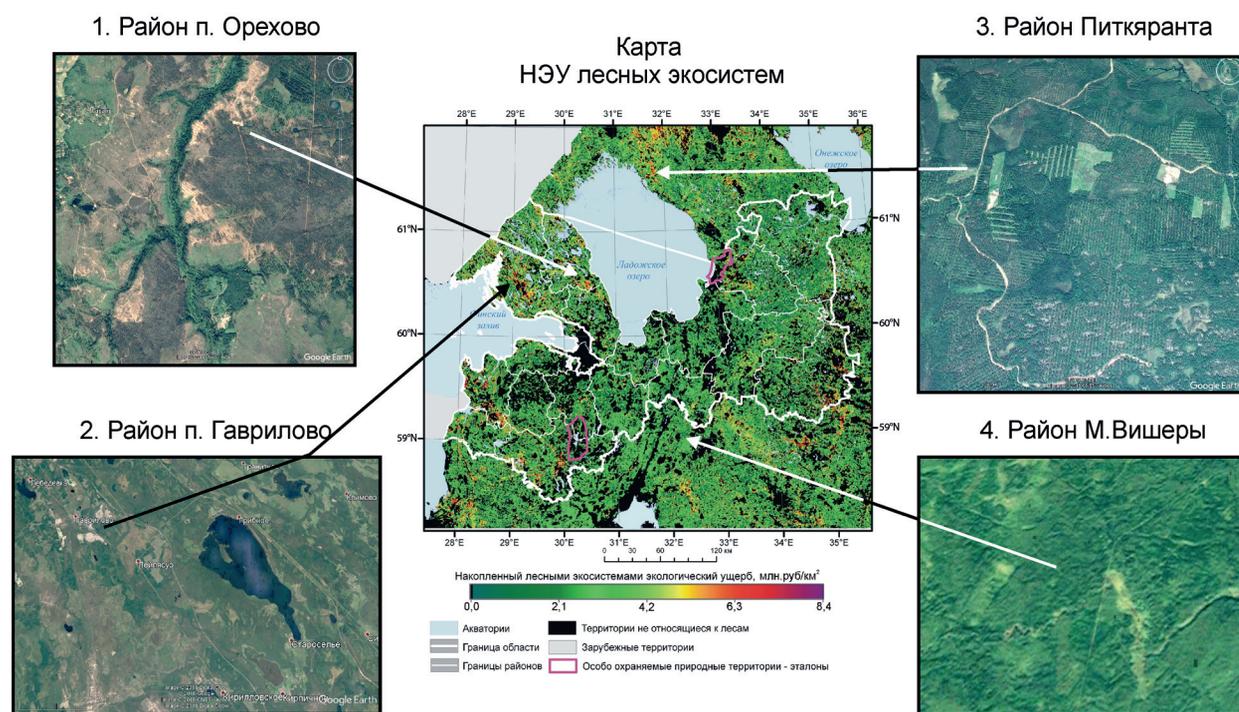


Рис. 4. Детализация участков с различным УНЭУ лесных экосистем; 1–4 — фрагменты крупномасштабных космических снимков (Google Earth)

Интересны и территории с достаточно высоким УНЭУ, расположенные на восточном берегу Ладожского озера (3 на рис. 4). Там находятся старые лесозаготовки, но на делянках прошлых сплошных рубок с последующим лесовосстановлением деревья ещё не достигли спелости. Это объясняет повышенный УНЭУ, так как молодой лес испаряет меньше, чем зрелый. В то же время в Подпорожском районе недавние рубки индицируются не столь высокими значениями УНЭУ. Это может быть вызвано тем, что делянки размерами около (0,5–2)×0,5 км располагались в шахматном порядке. При такой схеме рубок удельное испарение в пределах пикселя тепловых каналов спутника Terra(MODIS) размером 1×1 км снижается в меньшей степени, чем при старых сплошных рубках. Соответственно, и УНЭУ на таких участках снизился не столь кардинально, как в Заладожье. Леса, не подвергшиеся антропогенному воздействию (4 на рис. 4), характеризуются низкими значениями УНЭУ.

В целом отмечается тенденция повышения среднего по району УНЭУ с ростом расстояния от Санкт-Петербурга. Самый предварительный анализ мозаик сервиса Google Планета Земля (*англ.* Google Earth), составленных из материалов крупномасштабных космических съёмок, показывает, что это обусловлено более интенсивными рубками лесов в отдалённых районах, т. е. более бережным отношением к лесам, непосредственно примыкающим к Санкт-Петербургу. Анализ же распределения НЭУ по районам (см. *табл. 2*) выявил, что эта характеристика существенно зависит от площади лесов в районе. Например, в Подпорожском районе средний УНЭУ невелик (3,3 млн руб./км²), но за счёт большой площади лесов (4627 км²) этот район характеризуется высоким НЭУ ЛЭС (61,2 млрд руб.)

Необходимо отметить, что проведённый анализ достоверности карты УНЭУ является самым предварительным. Поэтому в дальнейшем необходимо на количественном уровне провести детальную верификацию метода.

Для выявления влияния принципа выбора здоровой ЛЭС на результат картографирования УНЭУ (по всей территории на основе статистического анализа скорости испарения или по ООПТ) была построена карта модуля ΔL — относительной разности УНЭУ, полученных двумя этими способами:

$$\Delta L = \frac{|L_s - L_p|}{L_p}, \quad (5)$$

где L_s — УНЭУ на основе выбора \hat{E}_o по всей территории путём статистического анализа скорости испарения с поверхности здоровой ЛЭС; L_p — УНЭУ, картографированный на основе выбора \hat{E}_o на территории ООПТ.

Анализ гистограммы (*рис. 5*) показал, что модуль относительной разности УНЭУ ЛЭС, закартированных двумя различными подходами, в основном не превышает 50%. Кроме того, более трети всех закартированных расхождений УНЭУ лежит в диапазоне 0–7%, что можно считать удовлетворительным при отсутствии верифицированной методики выбора здоровых ЛЭС. Необходимо отметить, что минимальные значения модуля ΔL отмечены в северной части Ленинградской области, занятой подзоной средней тайги. Это указывает на необходимость в дальнейшем изучить вопрос о целесообразности использования предварительного физико-географического районирования исследуемой территории для более правильного выбора здоровых (эталонных) ЛЭС при спутниковом картографировании УНЭУ.

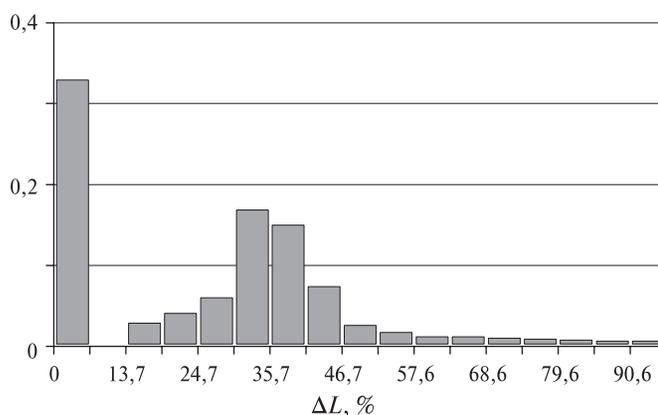


Рис. 5. Гистограмма модуля ΔL — относительной разности УНЭУ, полученных двумя способами выбора здоровых (фоновых) ЛЭС

Вероятно, что методика выбора здоровых ЛЭС может зависеть от типа воздействия: антропогенного или природного. Если внешнее воздействие на лесную экосистему является природным, например ветровал или массовое размножение вредителей леса, то выбор здоровых ЛЭС в пределах ООПТ требует наземной проверки, так как ЛЭС в ООПТ могут быть пора-

жены этими экологическими бедствиями. В таком случае предпочтительнее будет выбор здоровой ЛЭС по всей территории на основе статистического критерия.

Первый результат применения термодинамического подхода к спутниковому картированию НЭУ ЛЭС показывает явное преимущество этого феноменологического метода, заключающееся в отсутствии субъективных экспертных оценок. Безусловно, предложенная методология требует тщательной верификации и методических разработок. Одним из первоочередных моментов, для которых необходима проработка, является выбор здоровых (фоновых, референсных) ЛЭС для измерения \hat{E}_o .

Как следует из изложенных выше теоретических предпосылок, внешние воздействия на ЛЭС и её термодинамическая реакция на них происходят непрерывно. Соответственно, растительность, как живой организм, непрерывно компенсирует негативные последствия воздействия. Например, происходит восстановление лесов после рубок (3 на *рис. 4*). При этом имеет место динамический процесс. Всё зависит от соотношения интенсивности и времени воздействия, количества поглощённой растительностью солнечной энергии, времени, прошедшем с момента окончания воздействия. Вред, нанесённый ЛЭС в результате воздействия в предыдущие эпохи, может быть к настоящему времени в значительной степени компенсирован. В связи с этим, вероятно, более оправданно говорить просто об экологическом ущербе (ЭУ), имеющем место в данный момент времени, без упоминания такой его характеристики, как «накопленный».

Выводы

1. Феноменологический (макроскопический) подход, основанный на теоретических положениях термодинамики экосистем, позволил предложить измерительную методологию спутникового картирования УНЭУ ЛЭС, исключающую субъективные экспертные оценки.
2. Необходима детальная проработка методики выбора здоровых (фоновых, референсных) ЛЭС и наземная верификация предложенной методологии спутникового картирования НЭУ на примере лесных экосистем, нарушенных под влиянием различных факторов и в разных физико-географических условиях. Использование ООПТ в качестве эталонов для расчёта УНЭУ требует наземной верификации здоровья ЛЭС. В то же время новое применение ООПТ повысит народно-хозяйственную ценность этих природных резерватов.
3. По результатам спутникового картирования, наибольшим НЭУ Ленинградской области характеризуются Выборгский, Подпорожский и Тихвинский районы, а наименьшим — Волосовский, Гатчинский и Ломоносовский.
4. В перспективе данная методология картирования УНЭУ может быть развита до уровня технологии, функционирующей в полуавтоматическом или даже автоматическом режиме и выполняющей картирование УНЭУ всей лесной зоны России.

Литература

1. Барталев С. А., Егоров В. А., Ершов Д. В., Исаев А. С., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Уваров И. А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
2. Горный В. И. Космические измерительные методы инфра-красного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2004. Т. 2. № 1. С. 10–16.
3. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш. Термодинамический подход для дистанционного картографирования нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 179–194.

4. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Киселев А. В., Бровкина О. В., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Лубский Н. С. Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съёмок Санкт-Петербурга и Киева) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 51–66.
5. Калабин Г. В., Евдокимова Г. А., Горный В. И. Оценка динамики растительного покрова нарушенных территорий в процессе снижения воздействия комбината «Североникель» на окружающую среду // Горный журн. 2010. № 2. С. 74–77.
6. Калабин Г. В., Моисеенко Т. И., Горный В. И., Крицук С. Г., Соромотин А. В. Спутниковый мониторинг реакции растительного покрова на воздействие предприятия по освоению золоторудного месторождения «Олимпиада», отрабатываемого открытым способом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 1. С. 177–184.
7. Калабин Г. В., Горный В. И., Крицук С. Г. Спутниковый мониторинг реакции растительного покрова на воздействие предприятия по освоению Сорского медно-молибденового месторождения // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 1. С. 153–161.
8. Калабин Г. В., Горный В. И., Крицук С. Г. Оценка состояния окружающей среды территории Качканарского ГОКа по данным спутникового мониторинга // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 2. С. 179–187.
9. Калабин Г. В., Горный В. И., Давидан Т. А., Крицук С. Г., Тронин А. А. Реакция тундровой экосистемы на снятие техногенной нагрузки со стороны рудника «Валькумей» // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 146–153.
10. Крицук С. Г., Горный В. И., Калабин Г. В., Латыпов И. Ш. Закономерности сезонных циклов вегетационного индекса экосистем в районе Сорского горно-металлургического комплекса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 228–237.
11. Крицук С. Г., Горный В. И., Латыпов И. Ш. Повышение детальности спутникового картографирования теплофизических характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 277–290.
12. Лебедев Ю. В. Методология, принципы и практика оценки лесных экосистем // Лесной журн. 2015. № 1. С. 9–20.
13. Об утверждении Методических рекомендаций по проведению инвентаризации объектов накопленного экологического ущерба: приказ Федеральной службы по надзору в сфере природопользования от 25 апреля 2012 г. № 193.
14. Crist E. P., Cicone R. C. Application of the Tasseled-Cap concept to simulated Thematic Mapper data // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1984. V. 50. P. 343–352.
15. Jorgensen J. S., Svirezhev Yu. M. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Oxford: Elsevier, 2004. 366 p.
16. Masek J. G., Huang C., Wolfe R., Cohen W., Hall F., Kutler J., Nelson P. North American forest disturbance mapped from a decadal Landsat record // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. P. 2914–2926.
17. Mu Q., Zhao M., Running S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. Iss. 8. P. 1781–1800.
18. Mu Q., Zhao M., Running S. W. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3). Algorithm Theoretical Basis Document. Collection 5. NASA Headquarters. Numerical Terradynamic Simulation Group, University of Montana, 2013. 55 p.
19. Running S., Mu Q., Zhao M. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2017. DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A2.006.
20. van de Bund W., Solimini A. G. Ecological Quality Ratios for Ecological Quality Assessment in Inland and Marine Waters. European Commission, Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. Luxembourg, 2007. 24 p.

Thermodynamic approach to satellite mapping of accumulated ecological losses of forest ecosystems

V. I. Gornyy, A. V. Kiselev, S. G. Kritsuk, I. Sh. Latypov, A. A. Tronin

Scientific Research Center for Ecological Safety RAS, Saint Petersburg 197110, Russia

E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

Evapotranspiration of forest landcover could be a measure of the ecosystem health as we learn from the theoretical thermodynamics. To compute ecological losses of the forest ecosystem, we introduced an ecological damage index as a ratio of evapotranspiration decrement of damaged ecosystem to the evapotranspiration of the healthy one. Ecological losses were computed as a product of ecological damage index and an ecosystem cost. We discuss two ways to select a healthy ecosystem. The source data are MODIS/Terra Evapotranspiration 8-Day grid and Vegetation Map of Russia (Space Research Institute RAS product). The final products are a map of specific ecological losses of Leningrad Region and a rating of administrative districts by ecological losses. Finally, we computed ecological losses for all forests of Leningrad Region. We conclude that thorough verification of this new methodology is needed. In the future, it opens a way to automatic satellite mapping of forest ecosystem ecological losses.

Keywords: forest ecosystem, thermodynamics, damage, satellite, remote sensing, mapping, ecological losses

Accepted: 22.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-124-136

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A., Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektrometrii MODIS (Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
2. Gornyy V. I., Kosmicheskie izmeritel'nye metody infra-krasnogo teplovogo diapazona pri monitoringe potentsial'no opasnykh yavlenii i ob'ektov (Satellite based measuring remote sensing methods of infrared-thermal spectral band wile monitoring natural and technogenic hazardous events), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Vol. 1, No. 1, pp. 10–16.
3. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Termodinamicheskii podkhod dlya distantsionnogo kartografirovaniya narushennosti ekosistem (Thermodynamic approach for mapping disturbance of ecosystems by remote sensing methods), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 179–194.
4. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Kiselev A. V., Brovkina O. V., Filippovich V. E., Stankevich S. A., Lubskii N. S., Teplofizicheskie svoistva poverkhnosti gorodskoi sredy (po rezul'tatam sputnikovykh s'emok Sankt-Peterburga i Kiev) (Thermophysical properties of land surface in urban area (by satellite remote sensing of Saint Petersburg and Kiev), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 74–89.
5. Kalabin G. V., Evdokimova G. A., Gornyy V. I., Otsenka dinamiki rastitel'nogo pokrova narushennykh territorii v protsesse snizheniya vozdeistviya kombinata "Severonikel" na okruzhayushchuyu sredu (Estimation of dynamics of grows of derelict lands in process of deleterious effect decrease of OJSC "Severonickel Combine" on environment), *Gornyy zhurnal*, 2010, No. 2, pp. 74–77.
6. Kalabin G. V., Moiseenko T. I., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Soromotin A. V., Satellite monitoring of natural environment at Olimpiada gold open-cut mine, *J. Mining Science*, 2013, Vol. 49, No. 1, pp. 160–166.
7. Kalabin G. V., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Satellite monitoring of vegetation mantle response to the Sorsk copper-molybdenum mine impact, *J. Mining Science*, 2014, Vol. 50, No. 1, pp. 155–162.
8. Kalabin G. V., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Environmental appraisal of the area of Kachkanar mining-and-processing plant by satellite monitoring data, *J. Mining Science*, 2016, Vol. 52, No. 2, pp. 394–400.
9. Kalabin G. V., Gornyy V. I., Davidan T. A., Kritsuk S. G., Tronin A. A., Recovery of Tundra Ecosystem after Closure of the Valkumei Mine in Chukotka, *J. Mining Science*, 2018, Vol. 54, No. 2, pp. 315–322.

10. Kritsuk S. G., Gornyy V. I., Kalabin G. V., Latypov I. Sh., Zakonomernosti sezonnykh tsiklov vegetatsionnogo indeksa ekosistem v raione Sorskogo gorno-metallurgicheskogo kompleksa (Regularities of Vegetation Index Annual Cycles in the Region of Sorsk Mining and Metallurgical Complex), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 13, pp. 228–237.
11. Kritsuk S. G., Gornyy V. I., Latypov I. Sh., Povyshenie detal'nosti sputnikovogo kartografirovaniya teplofizicheskikh kharakteristik zemnoi poverkhnosti (Spatial resolution improvement of satellite mapping of thermal properties of land surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 277–290.
12. Lebedev Yu. V., Metodologiya, printsipy i praktika otsenki lesnykh ekosistem (Methodology, Principles and Practice of Forest's Ecosystems Estimation), *Lesnoi zhurnal*, 2015, No. 1, pp. 9–20.
13. Federal Service for Supervision in the Field of Environmental Management: Order No. 193, Date 25.04.2012.
14. Crist E. P., Cicone R. C., Application of the Tasseled-Cap concept to simulated Thematic Mapper data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1984, Vol. 50, pp. 343–352.
15. Jorgensen J. S., Svirezhev Yu. M., *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*, Oxford: Elsevier, 2004, 366 p.
16. Masek J. G., Huang Ch., Wolfe R., Cohen W., Hall F., Kutler J., Nelson P., North American forest disturbance mapped from a decadal Landsat record, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, Issue 6, pp. 2914–2926.
17. Mu Q., Zhao M., Running S. W., Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, Issue 8, pp. 1781–1800.
18. Mu Q., Zhao M., Running S. W., *MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3), Algorithm Theoretical Basis Document, Collection 5*, NASA Headquarters, Numerical Terradynamic Simulation Group, The University of Montana, 2013, 55 p.
19. Running S., Mu Q., Zhao M., *MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006*, NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2017, DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A2.006.
20. van de Bund W., Solimini A. G., *Ecological Quality Ratios for Ecological Quality Assessment in Inland and Marine Waters*, European Commission, Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg, 2007, 24 p.