# Термодинамический спутниковый мониторинг здоровья лесных экосистем водосборного бассейна Финского залива (на примере Карельского перешейка)

В. И. Горный<sup>1</sup>, А. В. Киселев<sup>1</sup>, П. А. Безрученко<sup>1</sup>, А. Б. Манвелова<sup>1</sup>, А. А. Тронин<sup>1</sup>, А. А. Бриль<sup>2</sup>, А. А. Мазуров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН Санкт-Петербург, 199178, Россия E-mail: v.i.gornyy@mail.ru <sup>2</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: evgeny@smis.iki.rssi.ru

Актуальная проблема экологической безопасности — мониторинг здоровья экосистем. С.Э. Йоргенсеном и Ю.М. Свирежевым (Jørgensen J.S., Svirezhev Yu. M. Towards a thermodynamic theory for ecological systems. Oxford: Elsever, 2004) разработаны основы термодинамической теории экосистем. Показано, что поглощённая экосистемой эксергия солнечного излучения затрачивается на депонирование углерода и вывод энтропии, генерируемой антропогенным и природным воздействием на экосистемы. Критерием здоровья экосистемы является количество содержащейся в ней эксергии. В настоящей работе для спутникового картирования здоровья экосистем использована скорость эвапотранспирации — прямо пропорциональная эксергии, затрачиваемой на депонирование углерода. Для этого был введён термодинамический индекс воздействия, равный отношению эвапотранспирации импактной экосистемы к эвапотранспирации здоровой. В качестве здоровой могут быть использованы экосистемы особо охраняемых территорий или экосистемы данного вида с наибольшим значением эвапотранспирации. Особенностью данного исследования стало внедрение технологии термодинамического спутникового картирования здоровья экосистем в Центре коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг», в том числе в систему «Вега-Science», где с 2001 г. в автоматическом режиме непрерывно пополняется база восьмидневных спутниковых композитов эвапотранспирации (пространственное разрешение 500×500 м) на всю территорию России. В качестве объекта исследований выбраны экосистемы Карельского перешейка как представительной территории водосборного бассейна Финского зал. На трёх примерах природного и антропогенного воздействия представлена эффективность предложенного показателя здоровья экосистем. Показано, что чувствительность технологии к нарушению здоровья экосистем столь высока, что позволяет картировать локальные нарушения здоровья экосистем, пространственные размеры которых на порядок меньше, чем разрешение использованных карт эвапотранспирации. Сделан вывод, что разработанная технология может быть оперативно применена региональными экологическими органами на всей территории России для синоптического анализа здоровья экосистем.

Ключевые слова: термодинамика, спутник, эвапотранспирация, здоровье экосистем, показатель, Карельский перешеек, воздействия, реакция экосистем

Одобрена к печати: 15.05.2024 DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-31-44

## Введение

Водосборный бассейн Финского зал. располагает большими объёмами поверхностных и подземных водных ресурсов. Поверхностные водные ресурсы региона, формирующиеся на площади водосбора в 420 000 км<sup>2</sup>, представлены густой, разветвлённой сетью водотоков, многочисленными озёрами и болотами. Территория бассейна располагается в регионе интенсивного хозяйственного развития. Основные экосистемы (ЭС) относятся к зоне тайги, доминирующие породы деревьев — сосна, ель, берёза и осина (Змитрович, 2012).

Хозяйственная деятельность на водосборах является важным фактором, влияющим на сток и водный баланс. Антропогенное воздействие на лесные экосистемы приводит к нарушению таких важных биосферных функций лесов как водорегулирующие и водоохранно-

защитные (Рубцов, 1972). Масштабные рубки, крупные лесные пожары, распространение насекомых-вредителей, а также различные природные факторы нарушения лесных ЭС определяют формирование стока (Онучин и др., 2014). Рубки леса изменяют распределение осадков, уменьшают эффективность использования воды растениями и вызывают эрозию почвы (Wei et al., 2022). Облесение территории способствует изменению таких гидрометеорологических характеристик как радиационный баланс, скорость ветра, осадков и испарения, температура и влажность почвы, уровень грунтовых вод, поверхностного стока (Лысенко, Логинов, 2020; Рахманов, 1984). При этом региональные особенности гидрологических последствий лесопользования могут проявляться по-разному в зависимости от характера лесозаготовок и эколого-климатических условий территории (Онучин и др., 2014; Wei et al., 2022; Zhang, 2013). Получение объективных оценок последствий лесопользования является актуальным направлением сохранения здоровья экосистем.

Ранее был разработан термодинамический индекс нарушенности ЭС (ТИНЭ), представлявший собой отношение дефицита количества эксергии в ЭС, вызванного антропогенным воздействием, к количеству эксергии солнечного излучения, поглощённого ЭС (Горный и др., 2019). На примере Берёзовых о-вов, расположенных у северного побережья Финского зал., с использованием материалов спутников высокого разрешения серии Landsat была показана его высокая чувствительность к антропогенному воздействию (Горный и др., 2013). Например, были закартированы заброшенные более 60 лет тому назад и заросшие лесом сельскохозяйственные угодья. Недостатком ТИНЭ является наличие нескольких факторов, определяющих значение этого индекса: спектральные особенности пропускания солнечного излучения атмосферой и его поглощения растительностью, испарение влаги с поверхности ЭС. Это осложняет выявление причин снижения здоровья ЭС, которые могут быть как химическими (воздействие на ЭС, проявляющееся в изменении цветовых характеристик зелёной массы), так и природными (понижение уровня грунтовых вод, снижающих эвапотранспирацию ЭС). Поэтому был предложен более простой индекс, основанный только на картировании удельной скорости эвапотранспирации. Этот индекс чувствителен к любым типам воздействий на ЭС и более прост в технике его картирования. В пределах водосборного бассейна Финского зал. этот метод был впервые реализован при картировании накопленного экологического ущерба лесов Ленинградской обл. (Горный и др., 2019) и на примере бассейна реки Луги (Манвелова и др., 2022) для анализа реакции лесных ЭС на техногенное воздействие.

К сожалению, в пределах бассейна р. Луги за исследуемый период не было отмечено существенных локальных природных воздействий. Поэтому одной из задач настоящего исследования было дальнейшее изучение возможности применения термодинамического подхода к картированию реакции таёжных ЭС как на антропогенные, так и на природные воздействия.

Второй причиной, инициировавшей подготовку настоящей статьи, стало включение технологии картирования здоровья ЭС в Центр коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг». Поэтому появилась необходимость доведения до пользователей ЦКП информации о новых возможностях. Представляется, что ознакомление специалистов разных регионов России с данной технологией позволит им разработать методики решения новых задач экологической безопасности при картировании здоровья ЭС.

Поэтому цель исследования заключается в оценке эффективности применения новой термодинамической методики спутникового картирования здоровья таёжных экосистем и ознакомление специалистов всех регионов России с возможностями ЦКП «ИКИ-Мониторинг» по реализации этого подхода.

#### Термодинамический подход к спутниковому мониторингу здоровья экосистем

В рамках термодинамической теории показано, что здоровье ЭС характеризует количество в ней Ex — эксергии\*. С помощью инструментальных наблюдений можно определить только приращение эксергии ЭС по отношению к эталонной (здоровой) ЭС (Jørgensen, Fath, 2008). Аналогично удельное приращение энтропии, т.е. возрастание хаоса экосистемы —  $\Delta S(\Delta \tau)$ , Дж·K<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>, за данный промежуток времени  $\Delta \tau$ , сут, характеризует деградацию ЭС (Горный и др., 2019; Jørgensen, Svirezhev, 2004):

$$\Delta S(\Delta \tau) = \frac{\Delta W_p + \Delta W_{ch} + \Delta \tau \Delta P}{T},\tag{1}$$

где *S* — удельная энтропия, S = Q/T, Дж·К<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>, определяющая уровень хаоса в ЭС; *Q* — удельное количество тепла, получаемого единицей площади ЭС из окружающей среды (ОС) или отдаваемого в ОС, Дж·м<sup>-2</sup>; *T* — средняя абсолютная температура ЭС (в К) за время воздействия  $\Delta \tau$ , сут;  $\Delta W_p$  и  $\Delta W_{ch}$  — удельные физические и химические нагрузки на ЭС за время воздействия соответственно, Дж·м<sup>-2</sup>;  $\Delta P$  — средняя за время воздействия удельная продуктивность единицы площади нарушенной ЭС, выраженная в энергетических единицах, Дж·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>, характеризует долю поглощённой ЭС солнечной эксергии, расходуемую на депонирование углерода. При этом расход эксергии и генерация энтропии — два различных описания одной и той же реальности (Jørgensen, Svirezhev, 2004).

Из уравнения (1) следует, что изменение годовой продуктивности ЭС определяется уровнем физического и химического воздействия на неё (Горный и др., 2019). Продуктивность ЭС может быть оценена исходя из массы воды  $m_C$ , которую необходимо испарить растению для депонирования единичной массы углерода:  $m_C = 879 \, \mathrm{kr}_{\mathrm{H},0}$  на 1 кг<sub>С</sub> углерода (Jørgensen, Svirezhev, 2004). Если ЭС находится в стационарном состоянии, т.е. в течение годового цикла вся энтропия, возникшая вследствие воздействий ОС на ЭС, выводится путём расходования поглощённой солнечной энергии, то средняя за время воздействия удельная продуктивность может быть представлена как (Jorgensen, Svirezhev, 2004):

$$P(x, y) = E(x, y)m_{\rm C},\tag{2}$$

где x, y — координаты элементарной площадки исследуемой территории. Так как  $m_{\rm C}$  — величина постоянная, то P(x, y) линейно зависит от E(x, y) — скорости испарения влаги с поверх-

ности элементарной площадки ЭС, кг<sub>H<sub>2</sub>O</sub>·м<sup>-2</sup>·сут<sup>-1</sup>, и E(x, y) может рассматриваться как мера здоровья ЭС (Горный и др., 2019).

Выражение (2) подтверждается наблюдениями (*puc. 1*).

На этом основании введён D(x, y) — показатель экологического вреда (ПЭВ) (Горный и др., 2019):

Рис. 1. Сопоставление годовых значений средней эвапотранспирации с валовой первичной продукцией (https://www.umt.edu/numericalterradynamic-simulation-group/project/modis/ mod16.php)



\* Количество работы, которую ЭС может произвести, когда она возвращается в состояние термодинамического равновесия с окружающей средой.

$$D(x,y) = \frac{E_o(x,y) - E(x,y)}{E_o(x,y)},$$
(3)

где  $E_o(x, y)$  и E(x, y) — удельные скорости испарения влаги соответственно здоровой и нарушенной ЭС в период максимума годовой вегетации. Из уравнения (3) следует, что ПЭВ есть отношение декремента удельной скорости испарения импактной ЭС к удельной скорости испарения здоровой (фоновой, референтной) ЭС, т.е. такой же импактной ЭС, но не подвергавшейся воздействию.

В ряде случаев, например при оценке накопленного экологического ущерба (Горный и др., 2019), удобно пользоваться показателем нарушенности экосистем:

$$d(x, y) = E(x, y) / E_o(x, y).$$
(4)

Отсюда, из соотношений (3) и (4):

$$D(x,y) = 1 - d(x,y).$$

#### Материалы и методы

Для исследования возможности применения термодинамического подхода к картированию здоровья ЭС на площади водосборного бассейна Финского зал. в качестве объекта исследования на территории Карельского перешейка были выбраны ЭС подзоны средней тайги (Змитрович, 2012). Перешеек отделяет с севера Восточную часть Финского зал. от Ладожского оз.

Обработка материалов спутниковых съёмок выполнена в системе «Bera-Science» (http:// sci-vega.ru) (Лупян и др., 2021), в которую в 2018 г. включена технология картирования ПЭВ. Карты ПЭВ строятся на основе стандартного продукта — цифровых карт эвапотранспирации (суммарного испарения), получаемого путём обработки данных прибора MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутниковых систем Aqua и Terra (Mu et al., 2013). Стандартный продукт MOD16A2GF (Running, Zhao, 2015; Running et al., 2021) представляет собой суммарное за восемь дней значение испаряемости, пропуски в исходных данных, вызванные наличием облачности, заполнены с помощью линейной интерполяции соседних по времени значений в данной точке. В ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (http://ckp.geosmis. ru) (Лупян и др., 2019) реализована полностью автоматизированная цепочка получения, обработки и архивации таких данных. Цифровые материалы на всю территорию России начиная с 2001 г. загружаются из открытого архива центра распространения данных LPDAAC (англ. Land Processes Distributed Active Archive Center, https://lpdaac.usgs.gov) и представляют собой покрытие поверхности Земли гранулами в синусоидальной проекции с пространственным разрешением 500×500 м (Running et al., 2017). Для изучения динамики эвапотранспирации, в том числе долговременной, во многих случаях удобно использовать не только отдельные (восьмидневные) измерения, но и различные интегральные показатели за периоды времени. Для наборов данных за периоды активной вегетации дополнительно создаются сезонные композиты со значениями средней, максимальной и минимальной эвапотранспирации за сезон. Все полученные результаты заносятся в архив, построенный на основе использования разработанной в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) технологии UNISAT (Прошин и др., 2016). После усвоения в архивах данные автоматически становятся доступны в программных и веб-интерфейсах различных информационных систем, реализованных ИКИ РАН с использованием возможностей ЦКП «ИКИ-Мониторинг», в том числе в системе «Вега-Science».

По данным эвапотранспирации в соответствии с уравнением (3), используя карту растительности, для каждого типа лесной экосистемы в границах некоторой области вычислялся ПЭВ. На сегодняшний день ПЭВ рассчитывается с использованием карты растительности России TerraNorte RLS (Барталев и др., 2011), подготовленной в ИКИ РАН и Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. Карта обновляется с интервалом в два года с использованием материалов съёмок спутниками Terra/Aqua (MODIS) (геометрическое разрешение на местности 250 м). При этом ПЭВ рассчитывается для семи типов лесных ЭС: темнохвойной, лиственной, светлохвойной, смешанной, смешанной с преобладанием хвойных, смешанной с преобладанием лиственных, хвойной листопадной. Для анализа также доступны сезонные варианты этих продуктов. В сервисах «Bera-Science» (http://sci-vega.ru), входящей в состав ЦКП «ИКИ-Мониторинг», реализован набор инструментов анализа имеющихся данных, в частности, расчёт ПЭВ по выбранной пользователем произвольной области, что позволяет анализировать состояние конкретных ЭС.

Для определения E(x, y), необходимой при картировании d(x, y), или D(x, y), может использоваться как статистический подход, так и средняя скорость испарения в пределах ЭС, расположенных в особо охраняемых природных территориях. В рамках статистического подхода выполняется следующее: в пределах всей территории данной ЭС вычисляются  $\overline{E}^{j}(x, y)$  — средние для ЭС каждого *j*-го вида значения и среднеквадратическое отклонение о этого распределения. При этом выполнялось условие  $E^{j}(x, y) \ge \overline{E}^{j}(x, y) + 3\sigma$ , где  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение вариаций  $E^{j}(x, y)$  в пределах данной *j*-й ЭС на всей территории Карельского перешейка. В результате строились ежегодные карты на летние периоды с 2001 по 2022 г. (*puc. 2*, см. с. 36).

На следующем этапе обработки для каждого пикселя для выбранного промежутка времени рассчитывается средняя скорость изменения ПЭВ за указанный период наблюдения (линейный временной тренд). Для этого с помощью метода наименьших квадратов рассчитываются коэффициенты линейной регрессии по времени и характеристики статистической значимости этой регрессии: *p*-значение — вероятность получить данное значение коэффициента регрессии при условии отсутствия тренда (нуль-гипотеза), которая рассчитывается с помощью теста Вальда в предположении, что проверяемая статистика подчиняется распределению Стьюдента.

Коэффициент вариации  $Var(x, y) = \sigma/|\overline{d}(x, y)|$  или  $Var(x, y) = \sigma/|\overline{D}(x, y)|$ , где:  $\overline{d}(x, y)$  или  $\overline{D}(x, y)$  — математические ожидания средних показателей для данной ЭС (см. *puc. 2*).

Коэффициент линейной регрессии (скорость изменения показателя во времени), p(x, y) — значение и Var(x, y) — коэффициент вариации представлены комплектом карт на один и тот же исследуемый участок. Анализ этих карт позволяет судить, во-первых, о надёжности определения тренда, во-вторых, о стабильности действия во времени техногенных или природных факторов, определяющих тренд ПЭВ.

Далее выполнялся визуальный анализ скорости изменения ПЭВ и находились участки с возрастанием этого коэффициента. Были выделены три участка (1–3 на *puc. 2*): 1 — участок Северный; 2 — участок завода сжиженного природного газа (СПГ); 3 — участок строительства железной дороги Лосево – Каменногорск в период с 2009 по 2017 г. Необходимо отметить, что в соответствии с приложенными цифровыми картами достоверности трендов (*puc. 36–в* (см. с. 37) и 46–в (см. с. 38)), эти тренды на участках высоких значений скорости изменения ПЭВ определены достоверно.

Для верификации выявленных высоких значений ПЭВ использовались карты изменений покрытия лесов на территории Ленинградской обл., представленные на открытом ресурсе «Леса высокой природоохранной ценности» (ЛВПЦ) (https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-leningrad). На этом ресурсе представлены ежегодные версии цифровых карт покрытия лесами Ленинградской обл., созданные на основе материалов высокого пространственного разрешения, полученных спутниками серии Landsat (пространственное разрешение 10 м в панхроматический канале и 30 м — в многоспектральном) и Sentinel-2 (пространственное разрешение 10 м).

Для анализа возможности применения карт ПЭВ для картирования ЭС, заражённых жуком короедом-типографом, из Центра защиты леса Ленинградской обл. были получены результаты лесопатологического мониторинга лесных кварталов за период с 2017 г. по 15.01.2024.

## Результаты и обсуждение

Визуальное дешифрирование ежегодных для периода 2001–2022 гг. цифровых карт ПЭВ (см. примеры на *рис. 2*) показало, что значения ПЭВ на территории Карельского перешейка не однородны. Низким значением ПЭВ индицируется особо охраняемая природная территория на Берёзовых о-вах (показаны красными стрелками на *рис. 2*). Вдоль границы с Финляндией отмечались повышения ПЭВ уже в 2001 г. (см. *рис.* 2). К 2008 г. На пограничной территории ПЭВ последовательно возрастал. В 2011 г. сформировалась вытянутая в юго-юго-восточном направлении полоса высоких значений ПЭВ, прослеживаемая от территории Финляндии до юго-западного побережья Ладожского оз. (показана чёрными стрелками на *рис. 2* (2011)). Северная часть этой полосы была выбрана в качестве тестового участка 1 для более детального анализа.



*Рис. 2.* Пример цифровых карт ПЭВ Карельского перешейка, подготовленных для разных годов. Красной стрелкой показаны Берёзовые о-ва — особо охраняемая природная территория (ООПТ), чёрными стрелками — последствия ветровала

## Участок 1

Причиной повышения ПЭВ на участке 1 в 2011 г. стал ветровой вывал леса, случившийся в Ленинградской обл. 30 июля 2010 г. Шквальный ветер прошёл полосой с северо-восточной части Карельского перешейка до юго-западного берега Ладожского оз. (показано чёрными стрелками на *рис. 2* (2011)). В результате ветрового вывала леса в Северо-Западном Приладожье и на Карельском перешейке в 2012–2013 гг. жук короед-типограф дал сильную вспышку численности (Хумала, Полевой, 2015). После ветровала была произведена интенсивная чистка лесов от упавших деревьев. Это прослеживается на цифровых картах ПЭВ и на графике ПЭВ (*puc. 6*, см. с. 39), где в 2011 г. отмечается значительное повышение этого показателя по сравнению с предыдущими годами. Вместе с тем с 2015 по 2022 г. наблюдалась тенденция к снижению ПЭВ (зелёные области на участке 1, см. *puc. 4*), что указывает на восстановление нарушенных ЭС путём развития мелколесья. Тем не менее, на карта-схеме динамики покрытия лесов (*puc. 5* (см. с. 39) — ресурс ЛВПЦ, получен по данным спутниковых снимков высокого разрешения) этот момент не отмечен. Скорее всего потому, что алгоритм этого ресурса был настроен на картирование особо ценных лесов, а картирование мелколесья не требовалось. Естественно, что эти области (см., например, область на юго-востоке Карельского перешейка, показанную коричневой стрелкой на *puc. 4*), не приведены на картасхеме прироста особо ценных лесов на ресурсе ЛВПЦ.



Рис. 3. Цифровые карты: a — тенденции изменения ПЭВ за период с 2001 по 2014 г. (1 — участок Северный; 2 — участок завода СПГ; 3 — участок строительства железной дороги Лосево – Каменногорск в период с 2009–2017 гг.; лесные кварталы, где лесопатологическими обследованиями выявлены: 4 — воздействия сильных ветров прошлых лет, повлёкшие наклон более 10°, изгиб или вывал деревьев; 5 — повреждения короедом-типографом. На вклейке сверху слева квартал 34 указан стрелкой);  $\delta$  — p-значение: 1 — <0,05; 2 — >0,05; 3 — >>0,05; e — значения Var: 1 — низкие; 2 — повышенные; 3 — высокие



Рис. 4. Цифровые карты: a — тенденции изменения ПЭВ за период с 2015 по 2022 г. (1 — участок Северный; 2 — участок завода СПГ; 3 — участок строительства железной дороги Лосево — Каменногорск в период с 2009—2017 гг.; лесные кварталы, где лесопатологическими обследованиями выявлены: 4 — воздействия сильных ветров прошлых лет, повлёкшие наклон более 10°, изгиб или вывал деревьев; 5 — повреждения короедом-типографом. На вклейке сверху слева квартал 34 указан стрелкой);  $\delta$  — p-значение: 1 — <0,05; 2 — >0,05; 3 — >>0,05; e — значения Var: 1 — низкие; 2 — повышенные; 3 — высокие

Обращает на себя внимание тот факт, что на цифровой карте тренда ПЭВ за период с 2001 по 2014 г. чётко отмечается тонкая линия высоких значений ПЭВ (показана красными стрелками на *puc. 3*). Эта линия индицирует зону строительства магистрального газопровода Грязовец – Выборг для подвода природного газа к компрессорной станции (КС) «Портовая» (см. участок 2 на *puc. 3, 5*). Строительство этого газопровода было начато в 2005 г. и закончено в 2011–2012 гг. (https://pronedra.ru/stroitelstvo-gazoprovoda-k-spg-kompleksu-na-ks-portova-ya-zaversheno-221064.html; https://invest.gazprom.ru/about/projects/seg/). По существующим нормам (СН 452-73. Нормы отвода земель для магистральных трубопроводов) ширина отвода земель для магистральных газопровода не превышает 45 м, что соответствует ширине отчуждения каждой из двух ниток этого газопровода, измеренной по снимкам сверхвысокого разрешения на ресурсе Google Earth. Тем не менее, эта линия отчётливо дешифрируется на цифровой карте тренда ПЭВ за период 2001–2014 гг. (см. *puc. 3*), что подтверждает высокую

чувствительность ПЭВ. При этом трасса газопровода не индицируется трендом повышения ПЭВ в период с 2015 по 2022 г. (см. *рис. 4*), что служит признаком начала восстановления ЭС. Необходимо отметить, что на *рис. 5* потери лесного покрытия вдоль строящейся трассы газопровода показаны фрагментарно и только в южной её части, хотя карта-схема потерь лесного покрытия построена по спутниковым снимкам высокого разрешения.



*Рис. 5.* Карта-схема потерь лесного покрытия по результатам дешифрирования спутниковых материалов высокого пространственного разрешения (https://hcvf.ru/ru/maps/hcvf-leningrad) в период: 1 — с 2001 по 2014 г.; 2 — с 2015 по 2022 г.

Сравнение многолетних средних по всему участку 1 значений ПЭВ с ПЭВ на лесном квартале 34 (показан стрелкой на вклейках на *puc. 3a, 4a*) с данными лесопатологического мониторинга, отметившего в 2021 г. заражение этого квартала жуком короедом-типографом, показало, что ПЭВ в пределах лесного квартала 34 возрос в 2020 г. и достиг максимального значения, превысившего D = 0,4 в 2021 г. В 2022 г. ПЭВ также находился на высоком уровне, близком к D = 0,4. Этот пример показывает, что цифровые карты ПЭВ могут своевременно указывать на угрозу заражения ЭС жуком короедом-типографом. Это может быть использовано для указания мест проведения наземного лесопатологического мониторинга.



Рис. 6. Изменение ПЭВ в период с 2001 по 2020 г. на участке 1: 1 — ежегодные значения ПЭВ, усреднённые по всей площади (62 км<sup>2</sup>) участка; 2 — ежегодные значения ПЭВ на площади лесного квартала 34 Дымовского участкового лесничества. Чёрной стрелкой показан год ветровала на Карельском перешейке. Красной стрелкой показан год заражения жуком короедом-типографом отмеченного при лесопаталогическом мониторинге квартала 34 Центром защиты леса Ленинградской обл.

#### Участок 2

В пределах этого участка ПАО «Газпром» в 2016 г. на побережье Выборгского зал. построило компрессорную станцию (КС) «Портовая» (см. *рис. 4*). На космических снимках Google Earth промплощадка размером ~0,9×1,0 км видна в сентябре 2012 г., что указывает на очистку территории от лесов. Но по официальным данным начало строительства — 2016 г., а окончание — 2019 г. После чего вблизи КС, ближе к берегу Финского зал. был построен Комплекс по сжижению природного газа «Портовая» (КСПГ) (официальное начало строительства — 2016 г., окончание — октябрь 2022 г.). Промплощадка (размер: ~1,5×0,9 км) появилась на космических снимках в октябре 2018 г.

На цифровой карте тренда отчётливо выделяется повышение ПЭВ в период строительства. Эти участки хорошо дешифрируются и на спутниковых материалах высокого разрешения (Google Earth и Карты покрытия лесов, см. *рис.* 5).





График (*puc.* 7) показывает, что изменение ПЭВ началось в 2010 г. Возможно, что повышение ПЭВ в 2010 г. связано с аномально жарким летом и ветровалом меньшей интенсивности, чем на участке 1. Не исключено, что в 2010 г. начали вырубать лес под промплощадку. При этом период строительства КС и КСПГ «Портовая» отмечается последовательным повышением ПЭВ. В настоящее время процесс роста ПЭВ стабилизировался на уровне более высоком, чем до строительства. Дальнейший мониторинг позволит оценить влияние КС и КСПГ «Портовая» на здоровье окружающих ЭС.

#### Участок 3

Участок включает построенную в период 2009–2017 гг. железную дорогу Лосево – Каменногорск (см. *рис. 3, 5*). Ширина зоны, отведённой под строительство, составляет ~150–250 м. Зона включает в себя железнодорожное полотно, вдоль него с южной стороны проходит грунтовая дорога, а за ней — просека с высоковольтной линией. Несмотря на ширину полосы в два раза меньшую, чем пространственное разрешение цифровой карты тренда ПЭВ, вся эта зона отчётливо видна на *рис. 3* и 4, что указывает на высокую чувствительность ПЭВ. В то же время на картосхеме динамики покрытия лесов, построенной по спутниковым снимкам высокого разрешения, участки в зоне строительства железной дороги показаны фрагментарно (см. *рис. 5*).

Ретроспективный анализ спутниковых снимков высокого разрешения на Google Earth показал, что техногенное воздействие на ЭС в зоне строительства железной дороги началось в 2011 г., что и нашло отражение на графике ПЭВ (*puc. 8*, см. с. 41). В целом изменения ПЭВ хорошо индицируют техногенное воздействие на ЭС в период строительства железной дороги. После завершения строительства (так же, как и на участке 2) ПЭВ снизился до уров-

ня, несколько превышающего уровень до начала строительства. Это объясняется снижением пылевой нагрузки и восстановлением травянистой и кустарниковой растительности на участках открытого грунта, образовавшихся в результате строительства.



*Рис. 8.* Изменение ПЭВ на участке 3. ПЭВ усреднён на площади строительства. Чёрной стрелкой показан официальный момент начала строительства, красной — момент завершения

### Выводы

Термодинамический мониторинг состояния ЭС Карельского перешейка на основе спутникового картирования ПЭВ проиллюстрировал возможность выявления негативного воздействия на здоровье ЭС как техногенных (строительство новых предприятий и линейных сооружений), так и природных воздействий (ветровал, вспышка численности жуков короедов-типографов).

- Чувствительность ПЭВ, построенного на основе термодинамической теории ЭС и использующего материалы спутникового картирования эвапотранспирации с поверхности ЭС с пространственным разрешением 500×500 м, оказалась достаточной для выявления локальных ареалов нарушения здоровья ЭС, значительно меньших по размеру, чем пространственное разрешение цифровых карт ПЭВ. При строительстве таких линейных сооружений, как железная дорога и магистральный газопровод, при реконструкции федеральной трассы «Скандинавия» возможность мониторинга здоровья ЭС на основе ПЭВ (пространственное разрешение 500×500 м) оказалась сравнимой с возможностями мониторинга с помощью спутниковых материалов высокого разрешения (10–30 м).
- Технология спутникового картирования ПЭВ, включённая в ЦКП «ИКИ-Мониторинг» позволяет оперативно выполнять региональный синоптический обзор здоровья ЭС и быстро намечать проблемные участки для выполнения верификации спутниковыми материалами высокого пространственного разрешения и наземными обследованиями.
- 3. Включение блока картирования ПЭВ в ЦКП «ИКИ-Мониторинг», в том числе в системе «Вега-Science», позволяет пользователям реализовать мониторинг здоровья лесных экосистем за период с 2001 г. по настоящее время на всей территории России, так как восьмидневные композиты эвапотранспирации регулярно автоматически добавляются в систему «Вега-Science», что обеспечивает пользователям и в будущем возможность мониторинга здоровья лесных экосистем по всей территории России.

# Литература

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д. В. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302. http://d33.infospace.ru/d33\_conf/2011v8n4/285-302.pdf.

- 2. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш. и др. Верификация крупномасштабных карт термодинамического индекса нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 201–212. http://d33.infospace.ru/d33\_conf/ sb2013t4/201-212.pdf.
- 3. *Горный В. И., Киселев А. Б., Крицук С. Г. и др.* Термодинамический подход к спутниковому картированию накопленного экологического ущерба лесных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 124–136. DOI: 10.21046/2070–7401-2019-16-4-124-136.
- 4. *Змитрович И.В.* Средняя тайга Карельского перешейка: зональные, интразональные и экстразональные явления // Вестн. экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2012. № 12. С. 54–76.
- 5. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А. и др. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 6. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др. Система «Вега-Science»: особенности построения, основные возможности и опыт использования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 9–31. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
- 7. *Лысенко С.А., Логинов В.Ф.* Роль лесов в поддержании водного баланса на территории Беларуси // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2020. Т. 64. № 2. С. 225–232. DOI: 10.29235/1561-8323-2020-64-2-225-232.
- 8. *Манвелова А. Б., Киселев А. В., Неробелов Г. М. и др.* Многолетние изменения дистанционно измеренных характеристик экосистем бассейна реки Луги как реакция на техногенное воздействие // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 40–56. DOI: 10.21046/2070–7401–2022-19-4-40-56.
- 9. *Онучин А.А., Буренина Т.А., Зирюкина Н.В., Фарбер С.К.* Лесогидрологические последствия рубок в условиях Средней Сибири // Сибирский лесной журн. 2014. № 1. С. 110–118.
- 10. Прошин А.А., Лупян Е.А., Балашов И.В. и др. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9-27.
- 11. Рахманов В. В. Гидроклиматическая роль лесов. М.: Лесная пром-сть. 1984. 240 с.
- 12. Рубцов М. В. Защитно-водоохранные леса. М.: Лесная пром-сть. 1972. 120 с.
- 13. *Хумала А. Э., Полевой А.* В. Находки редких и примечательных видов насекомых (*Insecta*) на территории Карелии // Тр. Карельского науч. центра РАН. 2015. № 6. С. 19–46. DOI: 10.17076/bg30.
- 14. Jørgensen S. E., Fath B. D. Encyclopedia of ecology systems. Oxford: Elsever, 2008. 3120 p.
- 15. *Jørgensen J. S., Svirezhev Yu. M.* Towards a thermodynamic theory for ecological systems. Oxford: Elsever, 2004. 366 p.
- 16. *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. Univ. Montana, 2013. 55 p.
- 17. *Running S. W., Zhao M.* Daily GPP and annual NPP (MOD17A2/A3) products NASA Earth Observing System MODIS land algorithm: MOD17 user's guide. 2015. P. 1–28. https://www.umt.edu/numerical-terradynamic-simulation-group/files/modis/MOD17UsersGuide2015\_v3.pdf.
- Running S., Mu Q., Zhao M. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006 1. [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (DAAC). 2017. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006.
- 19. *Running S., Mu Q., Zhao M., Moreno A.* MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. 2021, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.061.
- 20. Wei X., Giles-Hansen K., Spencer S.A. et al. Forest harvesting and hydrology in boreal Forests: Under an increased and cumulative disturbance context // Forest Ecology and Management. 2022. V. 522(3). Article 120468. DOI:10.1016/j.foreco.
- 21. *Zhang M*. The Effects of Cumulative Forest Disturbances on Hydrology in the Interior of British Columbia, Canada. PhD Environmental Science, University of British Columbia. 2013. 219 p. DOI: http://dx.doi. org/10.14288/1.0071984.

# Thermodynamic satellite monitoring of forest ecosystems health in the of Gulf of Finland catchment area (using the example of the Karelian Isthmus)

# V. I. Gornyy<sup>1</sup>, A. V. Kiselev<sup>1</sup>, P.A. Bezruchenko<sup>1</sup>, A. B. Manvelova<sup>1</sup>, A.A. Tronin<sup>1</sup>, A.A. Bril<sup>2</sup>, A.A. Mazurov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Federal Research Center RAS, Saint Petersburg 199178, Russia E-mail: v.i.gornyy@mail.ru
<sup>2</sup> Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: evgeny@smis.iki.rssi.ru

Monitoring of ecosystem health is an urgent problem of environmental safety. S. E. Jørgensen and Y.M. Svirezhev (Towards a thermodynamic theory for ecological systems, Oxford: Elsever, 2004) have worked out the basics of the thermodynamic theory of ecosystems. It is shown that the exergy of solar radiation absorbed by an ecosystem is spent on carbon deposition and the removal of entropy from the ecosystem, generated by anthropogenic and natural impact. The criterion for the health of the ecosystem is the exergy contained in it. In this paper, the rate of ecosystem evapotranspiration is used for satellite mapping of ecosystem health. For this purpose, a thermodynamic impact index was introduced equal to the ratio of evapotranspiration of an impacted ecosystem to evapotranspiration of a healthy ecosystem. The ecosystem of specially protected areas or the ecosystem of a given species with the highest evapotranspiration value can be used as a healthy standard of ecosystem. A feature of this study is the introduction of technology for thermodynamic satellite mapping of ecosystem health in the IKI-Monitoring Center for Collective Use, including in the Vega-Science system, where, since 2001, the database of 8-day satellite composites of evapotranspiration (spatial resolution  $500 \times 500$  m) for the entire territory of Russia has been collected in the automatic mode. The ecosystem of the Karelian Isthmus as a representative territory of the catchment area of the Gulf of Finland was chosen as the research object. Three examples of natural and anthropogenic effects on ecosystem demonstrate the efficiency of the proposed ecosystem health measure. It is shown that the sensitivity of the technology to ecosystem health disorders is so high that it allows mapping local ecosystem health disorders, whose spatial dimensions are an order of magnitude smaller than the resolution of the used evapotranspiration satellite maps. It is concluded that the developed technology can be quickly applied by regional environmental authorities throughout Russia for operational synoptic analysis of the health of the ecosystem.

**Keywords:** thermodynamics, satellite, evapotranspiration, ecosystem health, indicator, Karelian isthmus, impacts, ecosystem response

Accepted: 15.05.2024 DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-31-44

# References

- 1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V. et al., 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 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33\_conf/2011v8n4/285-302.pdf.
- Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh. et al., Verification of large scale maps of thermodynamic index ecosystem health disturbance, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 201–212 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33\_conf/sb2013t4/201-212.pdf.
- 3. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. et al., Thermodynamic approach for mapping disturbance of ecosystems by remote sensing methods, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 124–136 (in Russian), DOI: 10.21046/2070–7401-2019-16-4-124-136.
- 4. Zmitrivich I.V., Middle Taiga of Karelian isthmus: zonal, intrazonal and extrazonal phenomena, *Vestnik* ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya, 2012, No. 12, pp. 54–76.
- Loupian E. A., Proshin A. A., Bourtsev M. A. et al., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.210 46/2070-7401-2019-16-3-151-170.

- 6. Loupian E.A., Proshin A.A., Bourtsev M.A. et al., Vega-Science system: design features, main capabilities and usage experience, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 9–31 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31.
- Lysenko S.A., Loginov V.F., Role of forests in maintaining a water balance in the territory of Belarus, Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi, 2020, Vol. 64, No. 2, pp. 225–232 (in Russian), DOI: 10.29235/1561-8323-2020-64-2-225-232.
- Manvelova A. B., Kiselev A. V., Nerobelov G. M. et al., Long-term changes in remotely measured characteristics of ecosystems of the Luga River basin as a reaction to technogenic impact, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 40–56, DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-40-56.
- 9. Onuchin A. A., Burenina T. A., Ziryukina N. V. et al., Impact of Forest Harvesting and Forest Regeneration on Runoff Dynamics at Watersheds of Central Siberia, *Siberian J. Forest Science*, 2014, No. 1, pp. 110–118 (in Russian).
- Proshin A. A., Loupian E. A., Balashov I. V. et al., Unified satellite data archive management platform for remote monitoring systems development, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 9–27, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-9–27.
- 11. Rakhmanov V.V., *Gidroklimaticheskaya rol' lesov* (Hydroclimatic role of forests), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1984, 240 p. (in Russian).
- 12. Rubcov M.V., *Zashchitno-vodoohrannye lesa* (Protective and water-protective forests), Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1972, 120 p. (in Russian).
- 13. Humala A. E., Polevoi A. V., Records of rare and noteworthy insect species (Insecta) in the Republic of Karelia, *Trans. Karelian Research Centre RAN*, 2015, No. 6, pp. 19–46, DOI: 10.17076/bg30.
- 14. Jørgensen S. E., Fath B. D., Encyclopedia of Ecology Systems, Oxford: Elsever, 2008, 3120 p.
- 15. Jørgensen S. E., Svirezhev Yu. M., *Towards a thermodynamic theory for ecological systems*, Oxford: Elsever, 2004, 366 p.
- 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.
- 17. Running S. W., Zhao M., *Daily GPP and annual NPP (MOD17A2/A3) products NASA Earth Observing System MODIS land algorithm*, MOD17 user's guide, 2015, pp. 1–28, https://www.umt.edu/numerical-terradynamic-simulation-group/files/modis/MOD17UsersGuide2015\_v3.pdf.
- Running S., Mu Q., Zhao M., MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006 1. [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (DAAC), 2017, https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006.
- Running S., Mu Q., Zhao M. et al., MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. 2021, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, https://doi.org/10.5067/ MODIS/MOD16A2GF.061.
- 20. Wei X., Giles-Hansen K., Spencer S.A. et al., Forest harvesting and hydrology in boreal Forests: Under an increased and cumulative disturbance context, *Forest Ecology and Management*, 2022, Vol. 522(3), Article 120468, DOI:10.1016/j.foreco.2022.120468.
- 21. Zhang M., *The Effects of Cumulative Forest Disturbances on Hydrology in the Interior of British Columbia*, *Canada*, PhD Environmental Science, University of British Columbia, 2013, 219 p., DOI: http://dx.doi. org/10.14288/1.0071984.