Многолетние изменения дистанционно измеренных характеристик экосистем бассейна реки Луги как реакция на техногенное воздействие

А.Б. Манвелова¹, А.В. Киселев¹, Г.М. Неробелов¹, М.С. Седеева¹, А.Г. Махура², В.В. Петухов¹, И.В. Дроздова³, В.И. Горный¹

¹ Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

² Университет Хельсинки, Институт исследования атмосферных и наземных систем, Хельсинки, Финляндия E-mail: alexander.mahura@helsinki.fi

³ Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН Санкт-Петербург, 197376, Россия E-mail: alyssum7@gmail.com

За период 2000-2021 гг. проведён детальный анализ многолетних изменений различных дистанционно картируемых характеристик для изучения реакции экосистем на техногенное воздействие. Выявлены основные техногенные факторы, влияющие на состояние здоровья экосистем в бассейне р. Луги. Для этого по материалам спутниковой съёмки и результатам математического моделирования построен комплект цифровых карт трендов дистанционно измеренных характеристик экосистем. Показано, что анализ трендов характеристик экосистем, картируемых спутниками EOS среднего пространственного разрешения, позволяет с наименьшими, по сравнению с анализом спутниковых материалов высокого пространственного разрешения, трудозатратами выявить локальные участки, подвергшиеся техногенному воздействию. Отмечено, что региональные закономерности реакции экосистем на техногенное воздействие наиболее ярко проявляются в изменениях температуры подстилающей поверхности. Вместе с тем локальные участки реакции экосистемы на техногенное воздействие могут быть выявлены по вегетационному индексу и термодинамическому показателю нарушенности экосистем. Анализ цифровых карт дистанционно измеряемых характеристик показывает, что существенным региональным фактором техногенного воздействия на экосистемы западной части бассейна р. Луги выступает трансграничный атмосферный перенос токсикантов от источников (из труб эстонских ГРЭС), расположенных в районе г. Нарвы.

Ключевые слова: бассейн реки Луги, техногенное воздействие, спутниковая съёмка, дистанционно измеряемые характеристики экосистем, реакция экосистем

Одобрена к печати: 02.08.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-40-56

Введение

На начальном этапе развития спутниковых съёмок, проводившихся фотографическими системами, основным методом анализа состояния подстилающей поверхности (ПП) было визуальное дешифрирование снимков (Еремин, Попова, 1971). Дальнейшее развитие съёмочной аппаратуры в направлении цифровых измерительных съёмочных систем открыло возможность применения формализованных методов анализа и разработки на этой основе количественных критериев состояния здоровья экосистем. К ним относятся различные индексы (Zhou et al., 2016), в первую очередь нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (НДВИ, *анел*. Normalized Difference Vegetation Index — NDVI) (Шовенгердт, 2010), успешно применённый, например, при анализе реакции экосистем на техногенное воздействие со стороны предприятий освоения недр (Калабин и др., 2010, 2013, 2014, 2016, 2018; Крицук и др., 2013). Следующий этап в развитии методов картирования состояния экосистем был стимулирован разработкой Дж. С. Йоргенсеном и Ю. М. Свирежевым (Jorgensen, Svirezhev, 2004) термодинамической теории состояния экосистем. Практическим применением этой теории стал термодинамический подход к спутниковому картированию реакции экосистем на техногенное воздействие (Горный и др., 2011, 2013, 2019). Для расчёта дистанционно измеряемых термодинамических характеристик экосистем используются как карты суммарного испарения (эвапотранспирации), характеризующего физиологическую активность растений, так и карты эксергии отражённого от поверхности экосистем солнечного излучения (Вантеева и др., 2017; Горный и др., 2011, 2013, 2019, 2021; Пузаченко и др., 2014; Puzachenko et al., 2013, 2016).

Накопление многолетних архивов цифровых материалов измерительных спутниковых съёмок, создание Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019, 2022) открыло возможность и необходимость разработки методик спутникового картирования динамики здоровья экосистем, которые могли бы внедряться пользователями в практику экологического мониторинга. Для этого потребовалась верификация разработанных методик на хорошо исследованных объектах. Одним из таких объектов стал бассейн р. Луги (Ленинградская обл., Россия), который был выбран в качестве тестовой территории.

Поэтому цель настоящей работы заключается в анализе информативности многолетних изменений различных дистанционно картируемых характеристик ПП для выявления реакции экосистем на техногенное воздействие и выявление основных техногенных факторов, влияющих на здоровье экосистем бассейна р. Луги.

Материалы и методы

Цифровая карта (ЦК) трендов средней температуры ПП самого тёплого периода продолжительностью в 30 дней строилась по данным космических съёмок сканером MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленном на спутниках Terra и Aqua. Для построения ЦК использованы стандартные продукты MOD11A1 (спутник Terra) и MYD11A1 (спутник Aqua) (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a1v006, https://lpdaac.usgs.gov/products/ myd11a1v006), имеющие следующие характеристики: пространственное разрешение 1×1 км, ежедневная съёмка, эпоха с 2003 по 2021 г. Для построения ЦК обработано 10 000 сцен. Для каждого пикселя в сцене рассчитано среднесуточное значение температуры ПП как результат осреднения четырёх ежедневных спутниковых измерений (утреннее и вечернее — спутником Terra, дневное и ночное — спутником Aqua). Полученные ежедневные карты для повышения достоверности определения временного тренда дополнительно осреднялись с помощью плавающего окна размером 3×3 пикселя, т.е. для каждого значения находилось среднее из 9 прилегающих точек. Далее, для каждого пикселя ЦК строились временные ряды ежедневной среднесуточной температуры земной поверхности в период с 2004 по 2021 г. и с помощью плавающего окна шириной 31 день находились даты начала и конца самого тёплого в году месяца. После чего для каждого пикселя ЦК с координатами (x, y) определялась среднемесячная температура $\overline{t}(x, y)$, °C, ПП самого тёплого месяца данного года (Горный и др., 2021).

ЦК тренда НДВИ строилась по данным измерений спутника Terra (MODIS) в соответствии со следующим отношением (Шовенгердт, 2010):

HДBИ =
$$\frac{\rho_{\rm БИК} - \rho_{\rm кр}}{\rho_{\rm БИK} + \rho_{\rm кр}}$$
, (1)

где $\rho_{\rm БИК}$ и $\rho_{\rm кp}$ — энергия данного спектрального диапазона солнечного излучения, отражённая от ПП и зарегистрированная соответственно в ближнем инфракрасном и красном диапазонах спектра электромагнитного излучения. В настоящей работе использован стандартный продукт MOD13A3 версии 006 (Running et al., 2019) со следующими характеристиками: пространственное разрешение 1×1 км, средние за месяц значения НДВИ, эпоха с 2000 по 2021 г. Для построения карты обработано 80 сцен. Термодинамический показатель нарушенности лесных экосистем (ТПНЛЭ), вызванной антропогенными и природными воздействиями, рассчитывался по формуле (Горный и др., 2019):

$$D = \frac{E_0 - E}{E_0},\tag{2}$$

где E_0 и E, кг/(м²·сут), — удельная скорость испарения влаги с поверхности соответственно здоровой и нарушенной экосистемы данного типа леса. Для каждого типа лесных экосистем рассчитывались ежегодные значения периода максимума годовой вегетации D. Для этого использованы:

- регулярно обновляющиеся карты растительности России TerraNorte RL (Барталев и др., 2011), подготовленные в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) и Центре по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (ЦЭПЛ РАН) (*puc. 1*);
- карты скорости испарения, подготовленные по проекту НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, англ. NASA National Aeronautics and Space Administration) EOSDIS (англ. Earth Observing System Data and Information System) Land Processes DAAC (англ. Distributed Active Archive Center) (Li et al., 2015). Пространственное разрешение 500×500 м.



Рис. 1. Карта растительности в бассейне р. Луги (Барталев и др., 2011)

Для построения ЦК трендов дистанционно измеренных характеристик ПП использовалась методика, применённая ранее в работе (Горный и др., 2021). С целью выявления характера долговременных изменений температуры для каждого пикселя ЦК строились регрессии (графики) зависимости дистанционно измеренных характеристик ПП от времени (см., например, *рис. 2д*, см. с. 43). Все распределения анализировались отдельно и независимо друг от друга. Угловой коэффициент наклона линии регрессии пропорционален скорости изменения дистанционно измеренной характеристики ПП в данном пикселе цифровой карты, а знак этой величины показывает направление изменения — тренд. Угловые коэффициенты регрессий наносились на цифровые карты (см., например, *puc. 3a*). Для оценки надёжности и достоверности определения параметров линейной регрессии для каждого углового коэффициента вычислены статистические характеристики:

- *p* величина (*p*-value), показывающая достоверность полученных значений трендов. Тренды, для которых *p* > 0,05, считались недостоверными;
- *Var* коэффициент вариации, показывающий степень изменчивости среднеквадратического отклонения данной характеристики σ_V по отношению к среднему показателю выборки: $Var = \sigma_V / |\vec{V}|$, где \vec{V} математическое ожидание дистанционно измеренной характеристики *V*; σ_V среднеквадратичное отклонение характеристики *V*.



Рис. 2. Цифровые карты аэротехногенного воздействия на экосистемы бассейна р. Луги: a — среднемноголетняя концентрация SO₂ в нижнем слое атмосферы по данным съёмок спутником Aura в период 2003–2021 гг.; δ — среднее содержание SO₂ в нижнем слое атмосферы по данным математического моделирования с помощью модели Enviro-HIRLAM и с использованием базы эмиссий MSAQSO2L4 (*анга*. Multi-Satellite Air Quality Sulfur Dioxide (SO₂) Database Long-Term L4 Global V1, https://disc.gsfc. nasa.gov/datasets/MSAQSO2L4_1/summary); e — годовое выпадение ртути в 2015 г. (подготовлена в Hорвежском метеорологическом институте (*анга*. Norwegian Meteorological Institute, *норе*. Meteorologisk institutt) по результатам моделирования, https://thredds.met.no/thredds/catalog/data/EMEP/2021_ Reporting/catalog.html); e — многолетняя динамика эмиссии SO₂ из ГРЭС, расположенных в районе г. Hapвы, по данным баз MSAQSO2L4 и https://earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/ multi-decadal-sulfur-dioxide; ∂ — многолетняя динамика содержания SO₂ в атмосфере над бассейном р. Луги по данным съёмок спутником Aura в период 2004–2021 гг.

Цифровые карты *p*-значений и *Var* дополняли основные ЦК трендов характеристик (см., например, *puc. 36*, *в*). Области, в которых выполнялось условие p > 0,05, на ЦК трендов маскировались как недостоверные (см. 1 на *puc. 3a*). Далее анализировались только области с достоверными трендами.

Цифровая карта содержания диоксида серы (SO_2) в нижнем слое тропосферы до высоты 3 км за весь период наблюдения (2004–2021) (*рис. 2a*) построена по данным спектрометра OMI (*англ*. Ozone Monitoring Instrument) спутника Aura. Стандартным продуктом, содержащим

эти данные, представляется OMSO2e (Li et al., 2015). Основные характеристики использованных данных: пространственное разрешение 0,25°, ежедневная съёмка, эпоха 2004–2021 гг. Для построения карты обработано 6266 сцен ежедневной съёмки спутника Aura. При расчётах средних значений в каждом пикселе ЦК строились статистические распределения содержаний SO₂, за весь период наблюдений оценивалось среднеквадратическое отклонение содержаний σ_{SO_2} в данной точке, после чего отбраковывались отрицательные значения и значения, превышающие $3\sigma_{SO_2}$, как недостоверные, вызванные ошибками алгоритма расчёта концентрации.

Для выявления объектов, загрязняющих территорию диоксидом серы, использовано математическое моделирование процесса выпадения этого токсиканта из атмосферы, выполненное с помощью модели Enviro-HIRLAM (*om англ.* Environment — High Resolution Limited Area Model). Enviro-HIRLAM — это численная модель прогноза погоды и переноса химии в атмосфере (Baklanov et al., 2017). В данной модели расчёты пространственно-временного изменения атмосферной химии (газы и аэрозоли) и метеорологических параметров онлайнинтегрированы, т.е. выполняются одновременно. При этом моделируемые поля метеорологических и химических переменных взаимодействуют друг с другом на каждом временном шаге численного эксперимента.

Объект исследования

Бассейн р. Луги (площадь 13,2 тыс. км²) расположен на территории Ленинградской, Новгородской и Псковской областей и относится к подзоне южной тайги.

Бассейн обладает развитой гидрографической сетью, включающей р. Лугу (длина 353 км), её наиболее крупные притоки: Оредеж, Ящера, Лемовжа, Долгая, Саба, а также многочисленные малые реки. Территория бассейна характеризуется равнинным рельефом. Уклон местности незначительный и составляет 0,15 м/км. Малые уклоны рельефа дневной поверхности и избыточное увлажнение определяют наличие многочисленных заболоченных участков. Озёрность бассейна р. Луги небольшая и составляет около 2,0 % (Схема..., 2015).

Основные особенности климата — высокая влажность воздуха, умеренно тёплое и влажное лето и довольно продолжительная умеренно холодная зима с частыми оттепелями.

Наличие развитой гидрографической сети, пограничное расположение с Финским зал. определили разнообразие растительного мира. Климатические и почвенно-грунтовые условия благоприятны для произрастания древесных пород и формирования высокопроизводительных лесных насаждений (см. *рис. 1*). Основными лесообразующими породами считаются сосна, ель, берёза и осина. Леса относятся к зонам средней и сильной лесопатологической напряжённости. Волосовское, Гатчинское, Лужское лесничества расположены в зоне средней лесопатологической угрозы. Кингисеппское и Сланцевское лесничества находятся в зоне сильной лесопатологической угрозы (Обзор..., 2020; Состояние..., 2019).

Краткая характеристика техногенной нагрузки на экосистемы

Бассейн р. Луги относится к интенсивно развивающемуся экономическому району Ленинградской обл. В последние годы создаются новые предприятия и наращивают производство существующие. Особенно интенсивно развивается экономика в западной части бассейна. Например, в устьевой зоне р. Луги к 2025 г. планируется построить новый город с населением до 34 тыс.

Источниками техногенного загрязнения атмосферы выступают: ООО ПГ «Фосфорит», ОАО «Лужский абразивный завод», ОАО «Химик», ОАО «Леноблтеплоэнерго», а также другие предприятия строительной, лесной, деревообрабатывающей, пищевой, химической отраслей, городские территории и транспортные магистрали (Состояние..., 2019). В загрязнение атмосферы существенную долю вносит трансграничный перенос со стороны трёх эстонских государственных районных электростанций (ГРЭС), расположенных в районе г. Нарвы. Эти ГРЭС в качестве топлива используют горючий сланец, дающий при сжигании до 55 % золы (https://taltech.ee/goryuchiy-slanec, https://www.ebrd.com/downloads/integrity/rivne_kyiv_cr.pdf). В золе содержится значительное количество тяжёлых металлов: ртуть 0,4 мг/кг, ванадий, молибден (Янин, 2003). Например, ежегодное валовое содержание ртути в сланцах, добытых в 2001 г., составило 0,4–0,8 т (http://www.myshared.ru/slide/972625, https://www.ebrd. com/downloads/integrity/rivne_kyiv_cr.pdf). При этом 80 % всей ртути при сжигании сланцев поступает в атмосферу. Ещё одним экологически опасным фактором является высокая концентрация (~300 г/т) урана в горючих сланцах (Lippmaa, Maremäe, 2000; Vaasma et al., 2014). При сжигании горючих сланцев зола обогащается радиоактивными элементами (до сотых долей процента урана) (Vaasma et al., 2014), которые попадают в атмосферу и осаждаются на почву, скорее всего вместе с ртутью (Hg) (*puc. 26*).

Цифровые карты среднемноголетнего содержания SO_2 в атмосфере бассейна, построенные по материалам съёмок спутником Aura (см. *рис. 2a*), и ЦК выпадения на почву ртути, содержащейся в золе (*рис. 26*), иллюстрируют хорошее пространственное совпадение области выпадения ртути с повышенным загрязнением воздуха диоксидом серы (см. *рис. 2a*). Анализ этих ЦК (см. *рис. 2a–в*) показывает, что западная часть бассейна р. Луги больше подвержена аэротехногенному воздействию экотоксикантами со стороны трёх эстонских ГРЭС. В дополнение к постоянному воздействию со стороны ГРЭС территория Кингисеппского, Волосовского и частично Лужского районов подверглась также загрязнению радиоактивными осадками после аварии на Чернобыльской атомной электростанции, содержавшими радионуклиды цезия-137, цезия-134, рутения-106 и церия-104 (Состояние..., 2019).

Техногенное воздействие на экосистемы бассейна р. Луги происходит также в результате строительства промплощадок, газопроводов, жилых районов, добычи строительных материалов открытым способом, сельскохозяйственной деятельности, размещения отходов на полигонах и свалках бытовых отходов и т.д. В поверхностные воды бассейна поступают сбросы сточных вод предприятий водопроводно-канализационного хозяйства, промышленных, сельскохозяйственных и рекреационных объектов, а также поверхностный сток с водосбора.

Все эти разнотипные загрязнения неравномерно распределены по площади бассейна и комплексно воздействуют на различные экосистемы бассейна р. Луги. Поэтому целесообразно изучить динамику дистанционно измеренных характеристик экосистем для выявления характера и уровня реакции экосистем на техногенное воздействие.

Результаты и обсуждение

Тренд температуры подстилающей поверхности

На *рис. За* (см. с. 46) выделяются несколько локальных участков высоких значений скорости изменения температуры ПП (см. 2–4 на *рис. 3а*).

Визуальное дешифрирование крупномасштабных космических снимков пригородной зоны г. Сосновый Бор (*puc. 4*, см. с. 46) показывает, что высокой скоростью нагрева ПП (см. 4 на *puc. 3a*) индицируется новое садоводство, возникшее после 2003 г. и кардинально нарушившее естественную экосистему (см. *puc. 4*). Аналогично локальными областями положительного тренда температуры ПП отмечаются: южная окраина Санкт-Петербурга (2 на *puc. 3a*), где ведётся строительство жилых районов; южный берег Лужской губы (3 на *puc. 3a*), где за исследуемый период построена угольная гавань и комплекс по переработке этансодержащего газа. В пределах всей западной части бассейна также наблюдается несколько локальных участков высоких значений скорости нагрева ПП. По результатам визуального анализа крупномасштабных космических снимков, возможная причина формирования этих аномалий такая же, что и на рассмотренных выше участках (см. 2–4 на *puc. 3a*), — техногенное воздействие на экосистемы в результате подготовки территорий под коттеджные посёлки, добычи строительных материалов (песок и др.) открытым способом или сельскохозяйственная активность.



Рис. 3. Цифровая карта скорости изменения температуры ПП в самый тёплый месяц в бассейне р. Луги (эпоха 2004—2021 гг.) (а); красной линией отмечены границы бассейна р. Луги; 1 — области недостоверных значений скорости изменения температуры (*p*-значение >0,05); объяснение цифр на карте см. в тексте. Цифровая карта *p*-значений (б). Цифровая карта коэффициента вариации Var (в). Многолетняя динамика температуры ПП по данным спутникового картирования территорий со значимым положительным трендом в западной части бассейна р. Луги (г)



Рис. 4. Фрагменты крупномасштабных космических снимков (сервис Google Earth) района г. Сосновый Бор и Ленинградской атомной станции (ЛАЭС), полученные в 2003 и 2020 гг. Стрелкой показан участок высокого положительного тренда температуры ПП (см. 4 на *рис. 3a*)

Сравнение ЦК на *puc. За* с ЦК на *puc. Зб* показывает, что высокие значения положительного тренда температуры ПП соответствуют участкам с низкими значениями коэффициентов вариации, что указывает на постоянство факторов, определяющих нагрев ПП.

Анализ же площади всего бассейна р. Луги показывает, что в восточной половине бассейна за исследованный период достоверно не наблюдался статистически значимый тренд температуры ПП (*p*-значения >0,05) (1 на *puc. 3a*). Там же отмечены высокие значения коэффициентов вариации (*Var* > 57 %), т.е. отсутствие постоянно действующих факторов, влияющих на температуру ПП. В западной же его части расположена обширная область незначительного (до +0,05 °C/год) положительного тренда температуры ПП (см. *puc. 3*). Но при этом имеются локальные участки, в пределах которых тренд превышает +0,1 °C/год. Известно, что повышение техногенной нагрузки на экосистему, в том числе и при загрязнения ртутью (см. *puc. 26*), приводит к нарушению дыхания и транспирации растений (Jorgensen, Svirezhev, 2004). Согласно исследованию (Захожий и др., 2011), загрязнение почвы ртутью вызывает 2–3-кратное подавление ассимилирующей способности листьев, что приводит к нарушению соотношения фотосинтеза и дыхания. В присутствии тяжёлых металлов уменьшаются также

и показатели водного режима: оводнённость клеток и тканей, водный потенциал растений. Но особенно существенное влияние тяжёлые металлы оказывают на скорость транспирации (Kholodova et al., 2011). Главными причинами снижения транспирации при воздействии тяжёлых металлов представляются уменьшение числа устьиц и их размеров, закрытие устричной щели (Титов и др., 2014). Снижение охлаждающего влияния транспирации ведёт к повышению температуры (Горный и др., 2011; Jorgensen, Svirezhev, 2004). Поэтому региональный положительный тренд температуры ПП западной части бассейна может трактоваться как результат повышенной техногенной нагрузки на экосистемы. Это не противоречит выводам о природе высоких значений трендов температуры ПП на локальных участках 2–4 на *рис. 3a*. Сравнение же ЦК тренда температуры ПП (см. *рис. 3a*) с ЦК аэротехногенных токсикантов (см. *рис.* 2a-b) показывает хорошее совпадение формы региональной области повышенного тренда температуры ПП с пространственным распределением области повышенного выпадения ртути и высокого среднегодового содержания диоксида серы в нижнем слое атмосферы. Это совпадение позволяет говорить о закономерной температурной реакции экосистем западной части бассейна на прежде всего трансграничное аэротехногенное воздействие со стороны ГРЭС, расположенных в районе г. Нарвы, которое за последнее десятилетие постоянно снижается (см. *рис. 2г*, *д*). Существенное снижение эмиссии SO₂ отмечено в 2013 г. (см. рис. 2г) после реконструкции котлов и замены старых фильтров на ГРЭС новыми, снижающими в 100–150 раз объём выбросов SO₂ в атмосферу (Kuhi-Thalfeldt et al., 2010) (https://web. archive.org/web/20070707120807, https://www.ebrd.com/downloads/integrity/rivne_kyiv_cr.pdf). Анализ динамики содержания SO₂ в атмосфере (см. *рис. 2д*) показывает плавное снижение. Это может быть следствием того, что ГРЭС — не единственные источники данного токсиканта в атмосфере бассейна р. Луги. Следует отметить, что после 2013 г. не регистрируется снижение скорости нагрева ПП (см. *рис. Зг*), что может указывать на инерционность негативного воздействия депонирования SO₂ и Hg на экосистемы, хотя, по данным наземного мониторинга, в атмосферном воздухе городов, расположенных в бассейне р. Луги, наметилось снижение содержаний SO₂ (*таблица*).

Город	Средняя за год концентрация (по годам), мг/м ³										
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Кингисепп	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001
Луга	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001

Изменения уровня загрязнения атмосферы SO2 (Об экологической..., 2020; О состоянии..., 2012)

Нормализованный дифференциальный вегетационный индекс

Отличительной особенностью ЦК скорости изменения НДВИ стала её пятнистость. Аномальными отрицательными значениями тренда, достигающими -0.4 %/год, на *puc. 5a* (см. с. 48) индицируются места интенсивной техногенной нагрузки, отмеченные на ЦК трендов температуры ПП (участки 2–4 на *puc. 3a*). Отсюда следует, что на этих территориях в исследуемый период произошло практически полное исчезновение растительного покрова.

Обращают на себя внимание несколько достаточно обширных областей высоких положительных значений тренда НДВИ (4, 5 на *puc. 5a*). Анализ крупномасштабных космических снимков показал, что участку 4 на *puc. 5a* соответствует большой дачный посёлок в районе ст. Чаща, основанный в 1995 г., а участку 5 — заброшенные торфяные разработки. Естественно, что в дачном посёлке в течение периода исследований происходил рост садовых и огородных растений, и это ежегодно повышало уровень НДВИ. Следует отметить, что в обоих случаях на участках 4 и 5 не наблюдается чёткой тенденции к изменению температуры ПП (см. *puc. 3a*). Это указывает на то, что в данной области нет высокой постоянной техногенной нагрузки либо воздействие техногенной нагрузки компенсируется интенсивным приростом зелёной массы.



Рис. 5. Цифровая карта скорости изменения НДВИ в бассейне р. Луги (эпоха 2001–2021 гг.) (*a*); 1 — недостоверные результаты (*p*-значение >0,05), 2 — пиксель, для которого построена регрессия (см. *puc. 5г*); красной линией показаны границы бассейна р. Луги. Карта *p*-значений (б). Карта коэффициента вариации Var (в). Многолетняя динамика НДВИ на отвалах пустых пород западнее г. Кингисепп (см. 2 на *puc. 5a*) (г); серым тоном показаны доверительные интервалы линии тренда



Рис. 6. Фрагменты крупномасштабных космических снимков (Google Earth) района г. Кингисепп, полученные в 2004 и 2021 гг. Стрелкой показан участок высокого положительного тренда НДВИ (см. 3 на *рис. 5*)

На ЦК тренда НДВИ к западу от г. Кингисепп привлекает внимание вытянутый участок (3 на *рис. 5a*) высокой скорости роста НДВИ (превышающей 0,4 %/год), соответствующий *p*-значению <0,05 и низкому значению *Var* (<33 %). Анализ космических снимков высокого разрешения (*рис. 6*, см. с. 48) показал, что это результат рекультивации отвалов сланцедобывающего предприятия. Как следует из *рис. 5г*, начиная с 2001 г. наблюдался постоянный высокий рост НДВИ, что и проявилось на ЦК НДВИ (см. *рис. 5a*).



Термодинамический показатель нарушенности лесных экосистем

Рис. 7. Цифровая карта скорости изменения ТПНЛЭ (*a*): 1 — области отсутствия лесных экосистем, 2 — недостоверные результаты (*p*-значение >0,05); красной линией показаны границы бассейна р. Луги. Карта *p*-значений (*б*). Карта коэффициента вариации Var (*в*). Многолетняя динамика ТПНЛЭ на участке 3, *рис. 7a* (*г*); серым тоном показаны доверительные интервалы. Многолетняя динамика ТПНЛЭ на участке 4, *рис. 7a* (*д*); серым тоном показаны доверительные интервалы

Анализ ЦК скорости изменения ТПНЛЭ (*puc. 7a*) позволил выделить несколько участков с высокими значениями этого показателя. Прежде всего — участок, соответствующий лесному

массиву в Таицком лесничестве (3 на *puc. 7a*), в пределах которого достоверно (*puc. 76*) зарегистрирован постоянный высокий рост ТПНЛЭ (*puc. 7c*).

Дешифрирование крупномасштабных снимков и наземная их заверка показали, что за исследуемый период в этом лесном массиве проводились выборочные рубки (показаны стрелками на *puc. 8a*). Необходимо отметить, что площади этих рубок значительно меньше пространственного разрешения построенной ЦК (1×1 км) (см. *puc. 7a*). Это подтверждает ранее отмеченную нами (Горный и др., 2011, 2013, 2019) высокую чувствительность индексов и показателей, построенных в рамках термодинамического подхода, к оценке здоровья экосистем. Кроме того, становится возможным выдвинуть гипотезу о нарушении гидрологического режима лесного массива при производстве выборочных рубок, что может приводить к снижению эвапотранспирации с поверхности лесной экосистемы и, соответственно, к повышению значений ТПНЛЭ, рассчитываемого по формуле (2).



Рис. 8. Фрагменты крупномасштабных космических снимков (Google Earth): *а* — лесной массив к северо-западу от г. Гатчины (Таицкое лесничество) с выборочными рубками (3 на *рис. 7a*) (2002 и 2018 гг.);
б — участок строительства компрессорной станции газопровода возле г. Кингисепп (2018 и 2020 гг.) (4 на *рис. 7a*); *в* — участки сплошных рубок леса в Псковской обл. к западу от границы бассейна р. Луги (5 на *рис. 7a*) (2002–2020)

Ещё одним участком с высокими значениями ТПНЛЭ оказывается место строительства газопровода и промплощадки восточнее г. Кингисепп (4 на *puc. 7a*, *d*, *8б*). Отличительная особенность данного участка — недавнее нарушение лесных экосистем. Это отчётливо видно на *puc. 7d*, где в 2020 г. отмечается резкое возрастание годового значения ТПНЛЭ от пологой линии регрессии. Недавнее нарушение экосистемы подтверждается разновременными крупномасштабными космическими снимками (см. *puc. 8б*). На снимке 2018 г. видна лишь просека под газопровод и только началось создание промплощадки. А в 2020 г. на этом участке уже протянута вся лесная просека шириной 0,07 км и полностью сформирована промплощадка, максимальные размеры которой составляют $0,9 \times 0,6$ км (см. *puc. 86*). Эти техногенные объекты малы по сравнению с пространственным разрешением ЦК (см. *puc. 7a*). Несмотря на это, на ЦК (см. *puc. 7a*) трасса газопровода и промплощадка индицируются полосой высоких значений ТПНЛЭ шириной в 2 пикселя. Это указывает как на высокую чувствительность ТПНЛЭ, так и на негативное в период работ техногенное воздействие на лесную экосистему, примыкающую к территории, отведённой под строительство.

Интересной с точки зрения разработки методики оперативного спутникового мониторинга незаконных рубок представляется область 5 на *рис. 7a*, в пределах которой закартировано большое количество локальных участков с высокими значениями ТПНЛЭ. Как показало визуальное дешифрирование крупномасштабных снимков (см. *рис. 8e*), с 2002 по 2018 г. в этом месте на множестве делянок произведены сплошные рубки леса. Размеры делянок невелики и не превышают $0,2 \times 0,5$ км, что опять же указывает на высокую чувствительность ТПНЛЭ.

Заключение

В заключение следует отметить, что на примере бассейна р. Луги (Ленинградская обл., Россия) выявлены следующие закономерности:

- Анализ трендов дистанционно измеренных характеристик экосистем, проведённый на примере бассейна р. Луги по результатам многолетних (2004—2021) съёмок спутниками среднего пространственного разрешения EOS, позволяет с наименьшими усилиями по сравнению с анализом крупномасштабных спутниковых материалов выявлять локальные участки экосистем, подвергнувшиеся техногенному воздействию. Эти участки могут быть верифицированы применением крупномасштабных спутниковых материалов или полевыми работами. При этом региональные закономерности такой реакции наиболее отчётливо проявляются в температуре поверхности экосистем. А реакции экосистем на локальные техногенные воздействия индицируются на ЦК НДВИ и ТПНЛЭ. При этом ТПНЛЭ выступает наиболее чувствительным показателем.
- 2. Комплексный анализ дистанционно измеренных характеристик показал, что существенным региональным фактором техногенного воздействия на экосистемы западной части бассейна р. Луги становится трансграничный аэротехногенный перенос диоксида серы и золы из труб ГРЭС района г. Нарвы, использующих горючий сланец в качестве основного топлива. Зола, выбрасываемая этими ГРЭС, содержит высокую концентрацию таких тяжёлых металлов, как ртуть, молибден, уран. Выпадение из атмосферы тяжёлых металлов на почвы оказывает угнетающее воздействие на растительные сообщества и приводит к опережающему росту температуры поверхности экосистем.

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. URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011v8n4/285-302.pdf.

- 2. Вантеева Ю. В., Пузаченко Ю. Г., Сандлерский Р. Б. Оценка термодинамических переменных геосистем северо-восточного Прибайкалья на основе мультиспектральной дистанционной информации // Изв. Российской акад. наук. Сер. геогр. 2017. № 6. С. 99–116. DOI: 10.7868/S0373244417060093.
- 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. URL: http://d33.infospace.ru/d33_ conf/2011v8n2/179-194.pdf.
- 4. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Храмцов В. Н. Верификация крупномасштабных карт термодинамического индекса нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 201–212. URL: http://d33.infospace.ru/d33_ conf/sb2013t4/201-212.pdf.
- 5. Горный В.И., Киселев А.В., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А. 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.
- 6. *Горный В.И., Киселев А.В., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А.* Спутниковое картирование тепловой реакции подстилающей поверхности Северной Евразии на изменение климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 155–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
- 7. *Еремин В. К.*, *Попова Т. А.* Аэрометоды геологических исследований: монография / отв. ред. А. И. Виноградова / М-во геологии СССР. Лаб. аэрометодов. Л.: Недра. Ленингр. отд-ние, 1971. 703 с.
- 8. *Захожий И. Г., Далькэ И. В., Низовцев А. Н., Головко Т. К.* Биоаккумуляция и физиологические реакции растений на техногенное загрязнение среды ртутью // Теорет. и приклад. экология. 2011. № 2. С. 37–44. URL: http://envjournal.ru/ari/v2011/v2/11206.pdf.
- 9. *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.
- 10. 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-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 1. С. 177–184. URL: https://www.sibran.ru/upload/iblock/ca0/ ca0e138ae5cd7b9ade8e453de194a5a7.pdf.
- 11. 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. URL: https:// www.sibran.ru/upload/iblock/acd/acd142fd72791bbdba102e1ce7c52851.pdf.
- 12. 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. URL: https://www.sibran.ru/upload/iblock/d37/d37f3ff7a749724d32511f9cded81219.pdf.
- 13. *Калабин Г. В., Горный В. И., Давидан Т.А., Крицук С. Г., Тронин А.А.* Восстановление тундровой экосистемы после закрытия рудника «Валькумей» на Чукотке // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 146–153. DOI: 10.15372/FTPRPI20180216.
- 14. 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. URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t1/228-237.pdf.
- 15. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. 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.
- 16. Лупян Е.А., Константинова А.М., Кашницкий А.В., Ермаков Д.М., Саворский В.П., Панова О.Ю., Бриль А.А. Возможности организации долговременного дистанционного мониторинга крупных источников антропогенных загрязнений для оценки их влияния на окружающую среду // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 193–213. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213.
- 17. О состоянии окружающей среды в Ленинградской области: информационно-аналит. сб. / Комитет по природным ресурсам Ленинградской обл. СПб., 2012. 320 с.

- 18. Об экологической ситуации в Ленинградской области в 2020 году / Администрация Ленинградской обл.; Комитет по природным ресурсам Ленинградской обл. СПб., 2021. 264 с.
- 19. Обзор санитарного и лесопаталогического состояния лесов Ленинградской области за 2019 год и прогноз на 2020 год. СПб., 2020. 227 с. URL: http://czlspb.ru/page/332.
- 20. Пузаченко Ю. Г., Сандлерский Р. Б., Кренке А. Н., Пузаченко Ю. М. Мультиспектральная дистанционная информация в исследовании лесов // Лесоведение. 2014. № 5. С. 13–29. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22120945_78359353.pdf.
- 21. Состояние окружающей среды в Ленинградской области: информационно-аналит. сб. / Комитет по природным ресурсам Ленинградской обл. СПб., 2019. 449 с.
- 22. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Луга и рек бассейна финского залива от северной границы бассейна реки Луга до южной границы бассейна реки Невы. Кн. 1. Общая характеристика бассейна реки Луги и рек бассейна Финского залива от северной границы бассейна реки Луги и рек бассейна Финского залива от северной границы бассейна реки Луги до южной границы бассейна реки Невы. 2015. 117 с. URL: http://www.nord-west-water.ru/upload/skiovo/luga_132/skiovo_luga_132_book_1.pdf.
- 23. Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланова В. В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2014. 194 с.
- 24. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений: пер. с англ. / пер. А.В. Кирюшина, А.И. Демьяникова. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
- 25. Янин Е. П. Горючие сланцы и окружающая среда (экологические последствия добычи, переработки и использования). М.: ИМГРЭ, 2003. 86 с. URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-goryuchie-slancy-i-okruzhayushchuyu-sreda.pdf.
- Baklanov A., Korsholm U.S., Nuterman R., Mahura A., Nielsen K. P., Sass B. H., Rasmussen A., Zakey A., Kaas E., Kurganskiy A., Sørensen B., González-Aparicio I. Enviro-HIRLAM online integrated meteorologychemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2) // Geoscientific Model Development. 2017. V. 10. P. 2971–2999. DOI: 10.5194/gmd-10-2971-2017.
- 27. Jorgensen J. S., Svirezhev Yu. M. Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems. Oxford: Elsever, 2004. 366 p.
- 28. *Kholodova V., Volkov K., Abdeyeva A., Kuznezov V.* Water status in Mesembryanthemum crystallinum under heavy metal stress // Environmental and Experimental Botany. 2011. V. 71. P. 382–389. URL: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.02.007.
- 29. *Kuhi-Thalfeldt R., Kuhi-Thalfeldt A., Valtin J.* Estonian electricity production scenarios and their CO₂ and SO₂ emissions until 2030 // WSEAS Trans. Power Systems. 2010. V. 5. Iss. 1. P. 11–21.
- Li Č., Krotkov N.A., Leonard P. OMI/Aura Sulfur Dioxide (SO₂) Total Column L3 1 day Best Pixel in 0.25 degree × 0.25 degree V3. Greenbelt, MD, USA: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2015. DOI: 10.5067/Aura/OMI/DATA3008.
- 31. *Lippmaa E., Maremäe E.* Uranium production from the local Dictyonema shale in North-East Estonia // Oil Shale. 2000. V. 17. No. 4. P. 387–394.
- Puzachenko Y., Sandlersky R., Sankovski A. Methods of Evaluating Thermodynamic Properties of Landscape Cover Using Multispectral Reflected Radiation Measurements by the Landsat Satellite // Entropy. 2013. V. 15. Iss. 9. P. 3970–3982. DOI: 10.3390/e15093970.
- 33. *Puzachenko Y. G., Sandlersky R. B., Krenke A. N., Olchev A.* Assessing the thermodynamic variables of landscapes in thesouthwest part of East European plain in Russia using the MODISmultispectral band measurements // Ecological Modelling. 2016. V. 319. P. 255–274. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2015.06.046.
- Running S. W., Mu Q., Zhao M. Moreno A. User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6). Version 2.0. 2019. 36 p. URL: https://ladsweb. modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/modis/MOD16UsersGuideV2.02019.pdf.
- 35. *Vaasma T., Kiisk M., Meriste T., Tkaczyk A. H.* The enrichment of natural radionuclides in oil shale-fired power plants in Estonia The impact of new circulating fluidized bed technology // J. Environmental Radioactivity. 2014. V. 129. P. 133–139. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.01.002.
- 36. *Zhou Z. F., Ou J., Li S. H.* Ecological Accounting: A Research Review and Conceptual Framework // J. Environmental Protection. 2016. V. 7. No. 5. P. 643–655. DOI: 10.4236/jep.2016.75058.

Long-term changes in remotely measured characteristics of ecosystems of the Luga River basin as a reaction to technogenic impact

A. B. Manvelova¹, A. V. Kiselev¹, G. M. Nerobelov¹, M. S. Sedeeva¹, A. G. Makhura², V. V. Petukhov¹, I. V. Drozdova³, V. I. Gornyy¹

 ¹ Saint Petersburg Federal Research Center RAS, Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS, Saint Petersburg 197110, Russia E-mail: v.i.gornyy@mail.ru
² University of Helsinki, Institute for Atmospheric and Earth System Research Helsinki, Finland E-mail: alexander.mahura@helsinki.fi
³ Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg 197376, Russia E-mail: alyssum7@gmail.com

A detailed analysis of long-term changes in various remotely-mapped characteristics was carried out to identify the response of ecosystems to technogenic impact, as well as the main technogenic factors affecting the health of ecosystems in the basin of the Luga River (Leningrad Region, Russia). For this, by using the materials of satellite imagery and results of mathematical modeling a set of digital maps was constructed. It was shown that the analysis of trends of remotely measured characteristics of ecosystem, mapped by average spatial resolution EOS satellites, makes it possible to identify local areas that have undergone technogenic impact with the least effort compared to the analysis of large-scale satellite data. It is noted that regional patterns of ecosystem response to technogenic impact are most clearly manifested in the underlying land surface temperature. The local areas of ecosystem response to technogenic index of the compiled digital maps of remotely measured characteristics showed that the main factor of technogenic impact on the ecosystems in the western part of the Luga River basin is atmospheric transboundary aerotechnogenic transport of sulfur dioxide and ash from the stacks of the electric power station in the Narva city region of Estonia.

Keywords: Luga River basin, technogenic impact, satellite imagery, remotely measured characteristics of ecosystems, ecosystem response

Accepted: 02.08.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-40-56

References

- Bartalev S.A., Egorov V.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., 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), available at: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011v8n4/285-302.pdf.
- Vanteeva Yu. V., Puzachenko Yu. G., Sandlerskii R. B., Assessment of thermodynamic variables of geosystems in the northeastern Baikal region based on multispectral remote information, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2017, No. 6, pp. 99–116 (in Russian), DOI: 10.7868/S0373244417060093.
- 3. Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., 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 (in Russian), available at: http://d33.infospace.ru/d33_ conf/2011v8n2/179-194.pdf.
- Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Khramtsov V. N., 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), available at: http://d33.infospace.ru/d33_conf/ sb2013t4/201-212.pdf.
- Gornyy V.I., Kiselev A., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Thermodynamic approach to satellite mapping of accumulated ecological losses of forest ecosystems, *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.

- Gornyy V.I., Kiselev A.V., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A., Satellite mapping of the thermal response of ecosystems of northern Eurasia to climate change, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 155–164 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
- 7. Eremin V.K., Popova T.A., *Aerometody geologicheskikh issledovanii: monografiya* (Aerometodes of geological research), Ministerstvo geologii SSSR, Lab. Aerometodov, Leningrad: Nedra, 1971, 703 p. (in Russian).
- 8. Zakhozhiy I.G., Dalke I.V., Nizovtsev A.N., Golovko T.K., Bioaccumulation and physical reactions of plants on industrial pollution of the environment with mercury, *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2011, No. 2, pp. 37–44 (in Russian), available at: http://envjournal.ru/ari/v2011/v2/11206.pdf.
- 9. Kalabin G. V., Evdokimova G. A., Gornyy V. I., Estimation of dynamics of grows of derelict lands in process of deleterious effect decrease of OJSC "Severonickel copper smelter" on environment, *Gornyi zhurnal*, 2010, No. 2, pp. 74–77 (in Russian).
- 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, *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh is-kopaemykh*, 2013, No. 1, pp. 177–184 (in Russian), available at: https://www.sibran.ru/upload/iblock/ca0/ca0e138ae5cd7b9ade8e453de194a5a7.pdf.
- 11. Kalabin G. V., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Satellite monitoring of vegetation mantle response to the sorsk copper-molybdenum mine impact, *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2014, No. 1, pp. 153–161 (in Russian), available at: https://www.sibran.ru/upload/iblock/acd/acd142fd-72791bbdba102e1ce7c52851.pdf.
- Kalabin G. V., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Environmental appraisal of the area of Kachkanar mining-andprocessing plant by satellite monitoring data, *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2016, No. 2, pp. 179–187 (in Russian), available at: https://www.sibran.ru/upload/iblock/d37/ d37f3ff7a749724d32511f9cded81219.pdf.
- 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, *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2018, No. 2, pp. 146–153 (in Russian), DOI: 10.15372/FTPRPI20180216.
- 14. Kritsuk S. G., Gornyy V. I., Kalabin G. V., Latypov I. Sh., 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. 1, pp. 228–237 (in Russian), available at: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t1/228-237.pdf.
- Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A. M., Kobet D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., 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: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- Loupian E.A., Konstantinova A.M., Kashnitskii A.V., Ermakov D.M., Savorskii V.P., Panova O.Yu., Bril' A.A., The possibilities of organizing long-term remote monitoring of large sources of anthropogenic pollution to assess their impact on the environment, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 193–213 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-193-213.
- 17. On the state of the environment in the Leningrad Region, Saint Petersburg, 2012, 320 p. (in Russian).
- 18. On the environmental situation in the Leningrad Region in 2020, Saint Petersburg, 2021, 264 p. (in Russian).
- 19. *Review of the sanitary and forest pathology condition of the forests of the Leningrad Region for 2019 and forecast for 2020*, Saint Petersburg, 2020, 227 p. (in Russian), available at: http://czlspb.ru/page/332.
- Puzachenko Yu. G., Sandlerskiy R. B., Krenke A. N., Puzachenko Yu. M., Multispectral remote information in forest research, *Lesovedenie*, 2014, No. 5, pp. 13–29 (in Russian), available at: https://www.elibrary. ru/download/elibrary_22120945_78359353.pdf.
- 21. The state of the environment in the Leningrad Region, Saint Petersburg, 2019, 449 p. (in Russian).
- 22. Scheme of integrated use and protection of water bodies of the Luga River basin and the rivers of the Gulf of Finland basin from the nothern border of the Luga River basin to the southern border of the Neva River basin, Book 1. General characteristics of the Luga River basin and the rivers of the Gulf of Finland basin from the northern border the Luga River basin to the southern boundary of the Neva Rver basin, 2015, 117 p. (in Russian), available at: http://www.nord-west-water.ru/upload/skiovo/luga_132/skiovo_luga_132_book_1.pdf.
- 23. Titov A. F., Kaznina N. M., Talanova V. V., *Tyazhelye metally i rasteniya* (Heavy metals and plants), Petrozavodsk: KNC RAN, 2014, 194 p. (in Russian).
- 24. Schowengerdt R.A., *Remote sensing: Models and methods for image processing*, 3rd ed., Amsterdam: Elsevier; Burlington: Academic Press, 2006, 560 p.
- 25. Yanin E. P., Goryuchie slantsy i okruzhayushchaya sreda (ekologicheskie posledstviya dobychi, pererabotki i ispol'zovaniya) (Oil shale and the environment (environmental consequences of extraction, processing

and use)), Moscow: IMGRE, 2003, 86 p. (in Russian), available at: https://www.geokniga.org/bookfiles/ geokniga-goryuchie-slancy-i-okruzhayushchuyu-sreda.pdf.

- Baklanov A., Korsholm U.S., Nuterman R., Mahura A., Nielsen K. P., Sass B.H., Rasmussen A., Zakey A., Kaas E., Kurganskiy A., Sørensen B., González-Aparicio I., Enviro-HIRLAM online integrated meteorology-chemistry modelling system: strategy, methodology, developments and applications (v7.2), *Geoscientific Model Development*, 2017, Vol. 10, pp. 2971–2999, DOI: 10.5194/gmd-10-2971-2017.
- 27. Jorgensen J. S., Svirezhev Yu. M., *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*, Oxford: Elsevier, 2004, 366 p.
- 28. Kholodova V., Volkov K., Abdeyeva A., Kuznezov V., Water status in Mesembryanthemum crystallinum under heavy metal stress, *Environmental and Experimental Botany*, 2011, Vol. 71, pp. 382–389.
- 29. Kuhi-Thalfeldt R., Kuhi-Thalfeldt A., Valtin J., Estonian electricity production scenarios and their CO₂ and SO₂ emissions until 2030, *WSEAS Trans. Power Systems*, 2010, Issue 1, Vol. 5, pp. 11–21.
- Li C., Krotkov N.A., Leonard P., OMI/Aura Sulfur Dioxide (SO₂) Total Column L3 1 day Best Pixel in 0.25 degree × 0.25 degree V3, Greenbelt, MD, USA: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2015, DOI: 10.5067/Aura/OMI/DATA3008.
- 31. Lippmaa E., Maremäe E., Uranium production from the local Dictyonema shale in North-East Estonia, *Oil Shale*, 2000, Vol. 17, No. 4, pp. 387–394.
- Puzachenko Y., Sandlersky R., Sankovski A., Methods of Evaluating Thermodynamic Properties of Landscape Cover Using Multispectral Reflected Radiation Measurements by the Landsat Satellite, *Entropy*, 2013, Vol. 15, Issue 9, pp. 3970–3982, DOI: 10.3390/e15093970.
- 33. Puzachenko Y.G., Sandlersky R.B., Krenke A.N., Olchev A., Assessing the thermodynamic variables of landscapes in the southwest part of East European plain in Russia using the MODIS multispectral band measurements, *Ecological Modelling*, 2016, Vol. 319, pp. 255–274, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2015.06.046.
- Running S. W., Mu Q., Zhao M., Moreno A., User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16A2/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6), Version 2.0, 2019, 36 p., available at: https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/modis/MOD16UsersGuideV2.02019.pdf.
- 35. Vaasma T., Kiisk M., Meriste T., Tkaczyk A. H., The enrichment of natural radionuclides in oil shalefired power plants in Estonia — The impact of new circulating fluidized bed technology, *J. Environmental Radioactivity*, 2014, Vol. 129, pp. 133–139, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.01.002.
- 36. Zhou Z. F., Ou J., Li S. H., Ecological Accounting: A Research Review and Conceptual Framework, *J. Environmental Protection*, 2016, Vol. 7, No. 5, pp. 643–655, DOI: 10.4236/jep.2016.75058.