

УДК 528.8:504.054:574.3

DOI: 10.35595/2414-9179-2021-3-27-151-170

В.И. Кравцова¹, О.В. Тутубалина¹

**ДИНАМИКА СЕВЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМ
НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА
В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА
(ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ)**

АННОТАЦИЯ

Норильский горно-металлургический комбинат по производству никеля, платины и палладия – один из главных загрязнителей Арктики. Характер и степень его воздействия на природные экосистемы за длительную, с 1935 г., историю его работы, различались вместе с изменением объемов производства при разных формах собственности, а ответная реакция экосистем развивалась на фоне потепления климата. На основании обзора выполненных в регионе исследований выделены периоды с разным соотношением техногенных и природных факторов динамики экосистем, различающиеся и по методам их изучения. Во второй половине XX века, в 1970–1990-е годы рост выбросов в атмосферу сернистого газа привел к усыханию лиственничных лесов на расстоянии до 120 км к юго-востоку от комбината, зафиксированному аэрофотосъемками и лесопатологическими исследованиями, а также составленной по снимкам со спутника Landsat и полевым исследованиям МГУ картой состояния экосистем.

В конце XX века распад СССР, перерыв в работе комбината, перешедшего из государственной в частную собственность, обусловил снижение темпов производства и выбросов в атмосферу. Это сочеталось с потеплением климата, усилившимся в арктических районах. Комплексные экспедиционные работы сибирских ученых в первые десятилетия XXI века, включая геохимические и дендрохронологические исследования, зафиксировали границы зон разной степени нарушенности экосистем, но одновременно показали, что наряду с продолжающейся деградацией растительности появляются признаки частичного восстановления экосистем. В конце второго десятилетия XXI века российские и американские ученые на основе обработки больших объемов дистанционных данных, с опорой на разновременный анализ вегетационных индексов, обнаружили «позеленение» нарушенных местообитаний на территории Норильского района как результат вторичной сукцессии при сложном взаимодействии техногенных и природных, в первую очередь климатических, факторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: техногенное воздействие, гибель лесов, потепление климата, позеленение, космические снимки.

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: valentinamsu@yandex.ru

Valentina I. Kravtsova¹, Olga V. Tutubalina²

DYNAMICS OF THE NORTHERN ECOSYSTEMS OF THE NORILSK INDUSTRIAL REGION UNDER THE CONDITIONS OF TECHNOGENIC IMPACT AND CLIMATE WARMING (A REVIEW)

ABSTRACT

The Norilsk Mining and Metallurgical Plant for the production of nickel, platinum and palladium is the main pollutant in the Arctic. The nature and degree of its impact on natural ecosystems over a long, since 1935, history of its work, varied along with changes in production volumes under different forms of ownership, and the response of ecosystems developed against the background of climate warming. Based on a review of studies carried out in the region, periods with different ratios of technogenic and natural factors in the dynamics of ecosystems are distinguished, which also differ in the methods of their study. In the second half of the 20th century, in the 1970s–1990s, an increase in sulfur dioxide emissions into the atmosphere led to the drying up of larch forests at a distance of up to 120 km southeast of the plant, recorded by aerial photography and forest pathological studies, as well as by a map of the ecosystems state, compiled by Landsat imagery and MSU field research. At the end of the 20th century, after the collapse of the USSR, an interruption in the operation of the plant, which passed from state to private ownership, led to a decrease in production rates and emissions into the atmosphere. This was combined with climate warming, which intensified in the Arctic regions. Complex expeditionary work of Siberian scientists in the first decades of the XXI century, including geochemical and dendrochronological studies, fixed the boundaries of zones of varying degrees of disturbance of ecosystems, but at the same time showed that along with the continuing degradation of vegetation, partial restoration of ecosystems is taking place. At the end of the second decade of the XXI century, Russian and American scientists, based on the processing of large volumes of remote sensing data, based on a multi-temporal analysis of vegetation indices, discovered the "greening" of low habitats in the Norilsk region as a result of secondary succession with a complex interaction of technogenic and natural, primarily climatic, factors.

KEYWORDS: technogenic impact, forests destruction, climate warming, greening, satellite images.

ВВЕДЕНИЕ

Основанный в 1935 г. на месте богатого месторождения цветных металлов Норильский горно-металлургический комбинат, ныне концерн Норильск-Никель – один из крупнейших в мире производителей никеля, платины и палладия и один из главных загрязнителей Арктики. В 1920-х – 1930-х гг. территория в его окрестностях была занята лиственными лесами [Шелкунова, 1974]; нарушения растительности до 1960-х гг. ограничивались вырубками и пожарами [Tutubalina, Rees, 1999]. Но уже к 1970-м годам леса под воздействием выбросов в атмосферу сернистого ангидрида SO₂ начали усыхать и площади погибших лесов расширялись. За длительную историю существования комбината происходили важные изменения в его деятельности и влиянии на окружающую среду. С течением времени совершенствовались и методы исследования состояния экосистем. В советское время комбинат был государственным предприятием и постоянно наращивал произ-

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, e-mail: valentinamsu@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: valentinamsu@yandex.ru

водство, вместе с этим росло губительное воздействие на прилегающие леса. Но развал СССР вызвал на рубеже веков перерыв в его деятельности и переход в частную корпорацию с уменьшением производительности. Изменившееся воздействие на природную среду сочетается с потеплением климата, особенно усилившимся в Арктике. Наряду с благоприятным влиянием на растительность, воздействие потепления на состояние мерзлых грунтов привело к усилению аварийности и новым видам техногенных катастроф. Это обусловило необходимость нового витка исследований состояния экосистем региона, предпринимаемых различными организациями по заказу Норильско-Таймырской энергетической компании. В предстоящих работах необходимо учесть опыт и результаты многолетних предшествующих исследований, проводившихся различными организациями. Задача статьи – на основе аналитического обзора публикаций за все время работы комбината рассмотреть сложное взаимодействие техногенных и природных факторов на состояние экосистем региона, изменявшееся в периоды конца XX века, начала XXI века и его второго десятилетия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

За длительный период воздействия Норильского комбината на природную среду региона менялись и методы оценки ее нарушений. Для контроля за состоянием лесов неоднократно – в 1974, 1981, 1987 г. – проводилась аэрофотосъемка и составлялись лесопатологические карты [Космические..., 1998]. В начале 1990-х гг. выполнено геолого-экологическое картирование [Мельников и др., 1996]. В 1997 г. совместной экспедицией МГУ и Полярного института им. Скотта в Кембридже проведены комплексные полевые исследования (наземное спектрометрирование, геоботанические описания, аэровизуальные наблюдения) в радиусе 150 км от Норильска. Дешифрирование снимков со спутника Landsat-5,7 показало трудности отделения погибших редкостойных лиственничных лесов от травяно-кустарничковых тундр, необходимость учета для этого разносезонных снимков, отражающих стадии фенологического развития. Применение гибридной контролируемой-неконтролируемой классификации позволило впервые по космическим снимкам составить карту состояния растительности региона [Toutoubalina, Rees, 1999].

На втором этапе начала XXI в. исследования сибирских ученых опирались главным образом на проведенные в 2001–2013 гг. красноярским Институтом леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения РАН полевые работы по эталонным участкам, расположенным на разном удалении от источников выброса. Выполнены натурные и аналитические геохимические исследования почв, торфяных образований, растительности, мерзлотных явлений, снежного покрова. Исследования были сосредоточены на опорных ключевых участках в долине р. Рыбной на расстоянии от Норильска 22, 45, 68, 85 км; в последующем эти участки были охвачены повторными наблюдениями с интервалом до 7 лет. ГИС-методами обеспечивалось создание ЦМР ключевых участков и района в целом [Шишкин и др., 2014]

Натурные наблюдения дополнены дистанционными и геоинформационными методами. Выполнено картографирование растительности по снимкам со спутника Landsat-7 и материалам геоботанических полевых исследований на 7 полигонах, размещенных на территории от озера Пясино до Хантайского водохранилища [Телятников, Пристяжнюк, 2014]. Оценка степени нарушенности растительного покрова по наземным обследованиям 2001–2004 гг. дополнена также ГИС-анализом данных дистанционного зондирования — снимков Envisat/MERIS и SPOT/Vegetation за период 1998–2004 гг. [Корец и др., 2014]. Спутниковые наблюдения привлекаются и для регистрации загрязнения, разрабатываются алгоритмы для оценки выбросов SO₂ по спутниковым данным [Streets et al., 2013]. В Институте компьютерного моделирования созданы непараметрические алгоритмы для авто-

матической классификации и распознавания отклонений от естественного типа динамики растительности — индикаторов изменений в условиях жизни растений и техногенного воздействия на растительность [Shevyrnogov et al, 2000].

Важную дополнительную информацию дали дендрохронологические исследования. Для реконструкции влияния промышленности Норильска на леса северной Сибири выполнены физические и биохимические измерения ширины и вещественного состава колец годового прироста древесины сотен живых и погибших деревьев. Только в Норильском регионе сделано и обработано 268 спилов погибших стволов и живых деревьев лиственницы сибирской [Кирдянов и др., 2014]. Выявлено, что рост ширины колец, характерный для потепления, в районах техногенного воздействия замедляется (явление дивергенции).

На современном этапе конца второго десятилетия XXI века обнаруживающееся «позеленение Арктики» определило внимание к многолетнему ходу вегетационных индексов с использованием космических снимков от начала их поступления и привлечением новых методов обработки больших наборов данных. Такие исследования выполнены в Университете Вашингтона по материалам, полученным в рамках международных школ молодых мерзлотоведов в районе Норильска [Nyland, 2015] и в совместных проектах Московского и Кембриджского университетов [Тутубалина и др., 2020].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Конец XX века, 1970–1990-е годы

Норильский горно-металлургический комбинат с 1965 г. перешел на использование содержащих серу руд Талнахского месторождения. С этого времени начался рост выбросов в атмосферу сернистого ангидрида SO₂ и при картографировании оленьих пастбищ в конце 1960-х гг. было отмечено усыхание лиственничных лесов [Щелкунова, 1974]. Новый пик выбросов SO₂ в 1979 г. пришелся на начало работы медеплавильного завода в спутнике Норильска городе Надежда [Kozlov, Zvereva, 2007]. Общий объем выбросов увеличился с 2 млн тонн в 1980 г. до 4,5 млн тонн в 1991 г. Поступление SO₂ в атмосферу к концу 1990-х составляло 2,4 млн т в год [Toutoubalina, Rees, 1999]. Соединение SO₂ с влагой атмосферы вызывает сернокислые дожди, губительные для растительности. В 1968 г. отмечены первые признаки ослабления и гибели лесов. К лету 1970 г. древесная растительность была повреждена и погибла на площади более 5 тыс. га. В последующие годы площади погибших лесов увеличивались пропорционально росту производства, поскольку газоочистные сооружения отсутствовали. По материалам повторных аэрофотосъемок к 1975 г. площадь поврежденных промышленными выбросами лесов составила более 200 тыс. га [Филипчук, Ковалев, 1990], увеличилась до 1400 тыс. га в середине 1980-х, а по более поздним оценкам до 2 млн га [Lukina, 2011 – в Nyland et al, 2017]. Площадь погибших лесов за 1976–1991 гг. выросла с 50 тыс. га до 400 тыс. га [Ковалев, 1994]. Граница погибших насаждений продвинулась в направлении преобладающих в летний период ветров на юго-юго-восток к 1990 г. на 100 км [Klein, Vlasova, 1992], а к 1997 г. на 120 км до Хантайского водохранилища и Малого Хантайского озера и на восток на 60 км, охватив низовья долин, расчленяющих плато Путорана. Южная граница поврежденных лесов достигла р. Кулюмбэ, а признаки повреждения в виде пожелтения хвои отмечались на расстоянии до 200 км к югу от Норильска – до р. Курейка [Космические..., 1998].

В 1980-х гг. оказались востребованными и появились материалы геоэкологической оценки территории вокруг комбината [Харук и др., 1996]. По весенним космическим снимкам со снежным покровом (Ресурс-Ф, май 1987 г.) и наземным наблюдениям с отбором проб снега Е.И. Пижанковой выявлены площади осаждения твердых фракций загрязнения воздуха в радиусе 100 км от Норильска [Космические..., 1998]. На основе полевых

исследований составлена ландшафтно-экологическая карта Норильского промрайона, охватывающая Норильск, Талнах, Надежду, Кайеркан [Белая и др., 1996, Горшков, 1997]. Выделены зоны с разной степенью загрязнения природной среды вокруг комбината на значительном удалении от него [Мельников и др., 1996].

Оценка состояния растительности региона по космическим снимкам выполнена группой сотрудников Московского университета и Полярного института им. Скотта в Кембридже на основе проведенных в августе 1997 г. комплексных полевых исследований. По снимку Landsat 5/TM 9 июля 1995 г. составлена карта, охватывающая участок 90 × 90 км вокруг Норильска (рис. 1). Карта характеризует земные покровы с указанием типа растительности, ее густоты, особенностей почв при разреженном покрове, степени нарушенности экосистем – всего 24 класса. Это первая составленная по космическим снимкам карта, отражающая состояние растительности Норильского района [Toutoubalina, Rees, 1999].

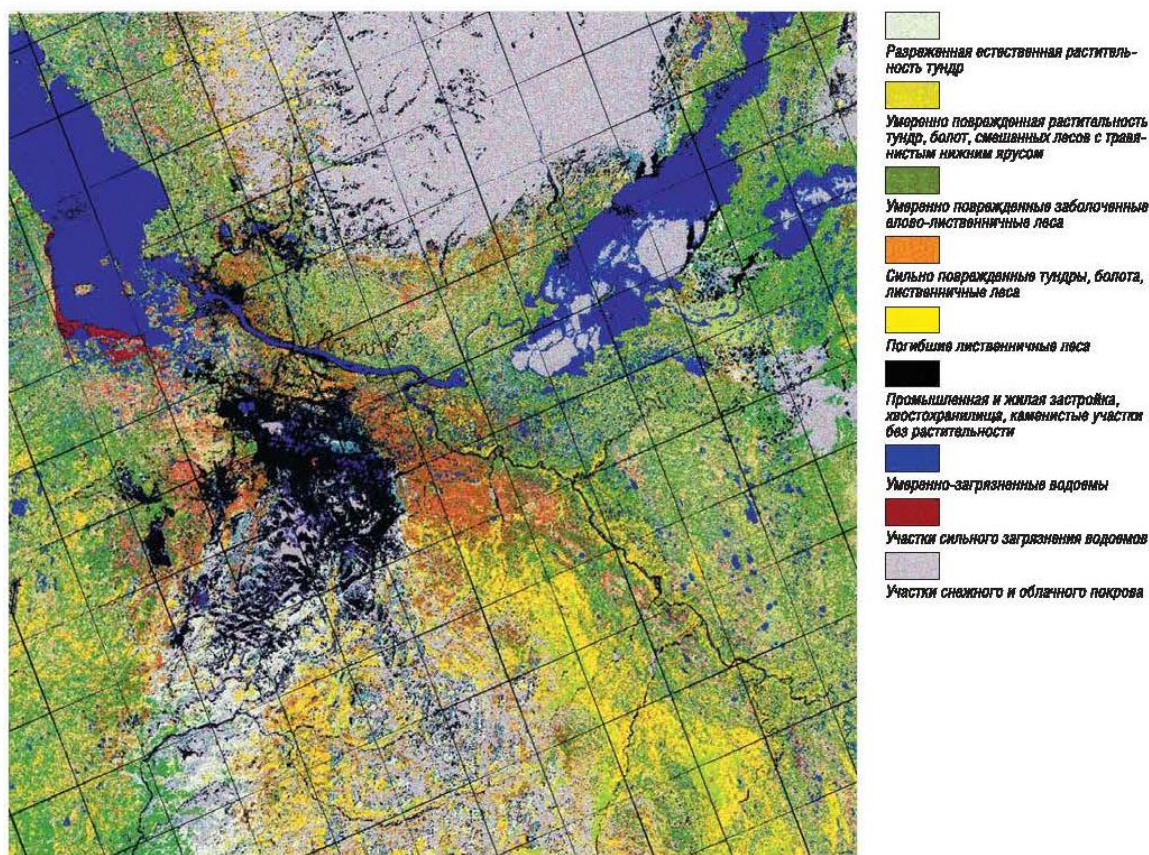


Рис. 1. Карта состояния растительности Норильского района, составленная на основе гибридной классификации снимка Landsat TM 1995 г. с опорой на данные полевых исследований 1997–98 гг. Легенда обобщена. Координатная сетка через 8 км [Toutoubalina, Rees, 1999]

Fig. 1. Map of the vegetation state in the Noril'sk region compiled through hybrid classification of a 1995 Landsat TM image on the basis of 1997–98 field data. The legend is generalized. 8-km coordinate grid [Toutoubalina, Rees, 1999]

В дополнение к этой обзорной карте, на небольшой участок 30 × 17 км вблизи Норильска выполнен анализ панхроматического снимка KeyHole 1961 г. и при сравнении со снимком Landsat-5 1995 г. получены данные об изменениях самого города (промзоны, прудов-охладителей) и о гибели растительности вокруг города за 34 года [Tutubalina, Rees,

2001]. Другими специалистами в пределах города исследована также реакция городских сооружений, построенных на многолетнемерзлых грунтах, на начавшееся потепление климата [Grebenets, Savchenko, 1995]. Выполнено изучение техногенного оползня севернее карьера Медвежий ручей, спровоцированного потеплением и угрожающего промзоне города [Гребенец и др., 2019]. Предпринято изучение городского «острова тепла» на основе сочетания данных наземных измерений автоматических метеостанций и тепловых снимков, полученных системой MODIS [Варенцов и др., 2014].

Рубеж веков □ 1990-е гг. и первые десятилетия XXI века

В конце XX века драматично менялась организационная структура управления комбинатом. В 1989 г. в связи с истощением месторождений в Мурманской области Норильский комбинат был объединен с Североникелем и Печенганикелем в государственный концерн Норильский Никель. После распада СССР в 1991 г. он преобразован в РАО Норникель и в 1994 г. приватизирован по частям через аукцион. В 1995 г. по указу Б. Ельцина образован холдинг Норникель, купленный банком ОНЕКСИМ. В 1997 г. управление перешло основателям этого банка В. Потанину и М. Прохорову. В 1998 г. дефолт и финансовый кризис, а также последовавший мировой экономический кризис привели к падению рынков и перерыву производства. В 2001 г. предпринята финансовая реструктуризация предприятия и в августе начат выпуск никеля [Humphreys, 2011].

На рубеже веков вместе с изменением статуса компании и организации производства меняется соотношение техногенных и природных факторов, определяющих состояние экосистем региона. Все более значимым становится влияние потепления климата, особенно сильно проявляющееся в арктических широтах, где по данным НАСА MERRA за 30 лет (1980-е – 2010-е) отмечено повышение температур воздуха на 1,22 °C со скоростью 0,05 °C в год [Nyland, 2015], а на Таймыре даже 0,08 °C в год [Anisimov et al., 2013; Росгидромет, 2014]. Это приводит к изменению атмосферного давления, полей ветра, режима осадков, продолжительности сезона таяния и через них – к влиянию на биологические системы и углеродный цикл [Macdonald et al., 2005].

Выполнено сопоставление климатических моделей НАСА, разработанных на период 1950–2100 гг., с данными спутниковых наблюдений, в частности продолжительности залегания снежного покрова SCF (Snow Cover Frequency) по данным MODIS за 2001–2016 гг. В целом по Арктике уменьшение SCF составляет 0,91 день/год. В соответствии с расчетными моделями, площадь районов с холодным летом сократится к 2100 г. на 40%, они будут замещены районами с теплым и жарким летом. На представленных климатических картах экосистем 1951 и 2099 гг. район Норильска с современным холодным летом окажется в зоне климата с теплым и жарким летом [Eythorsson et al., 2019].

Взгляд на Землю как единую систему обострил внимание не только к ее естественным долговременным изменениям, но и к глобальным аспектам антропогенных и техногенных вторжений в функционирование этой системы. Современные климатические изменения в Арктике влияют на глобальные потоки ее загрязнения – воздушные и водные [Macdonald, Harner, Fyfe, 2005]. Для глобального мониторинга загрязнения атмосферы Земли, первостепенную значимость приобретают спутниковые методы. Измерения антропогенного SO₂ выполнялись в спутниковых экспериментах GOME, GOME-2, SCIAMACHY, OMI. Выполнен обзор алгоритмов для оценки выбросов SO₂ по спутниковым данным [Streets et al., 2013]. Создаются каталоги и базы данных глобального загрязнения выбросами SO₂. На карте мира, составленной по данным GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) за 1996–2002 г., в Азии четко выделяется пятно Норильского промышленного района [Khokhar et al., 2005]. На картах мира, составленных на основе базы данных PKU-FUEL, разработанной Пекинским университетом, Норильск выделяется мак-

симальными выбросами в 2005 г. [Luo et al., 2020]. Данные о выбросах SO₂ в атмосферу, полученные со спутников Aura (OMI) и Suomi NPP (OMPS) использованы в экспериментах по картографированию зон экологического риска вблизи Норильска [Zotin et al., 2018]. Кроме спутниковых, для локальных исследований загрязнения в окрестностях Норильска опробованы самолетные эксперименты [Walter et al, 2012].

В новых условиях изменения функционирования концерна Норникель, и все сильнее проявляющегося климатического потепления, территория Норильского промышленного района привлекла пристальное внимание научного сообщества. Многолетние комплексные исследования специфики воздействия горнодобывающего и металлургического производства на лесотундровую растительность и другие компоненты биоценозов проведены в 2001–2013 гг. красноярским Институтом леса им. В.Н. Сукачева Сибирского Отделения РАН по проекту «Комплексная оценка состояния и мониторинг природной среды с целью выявления количественных критериев допустимого воздействия на ее компоненты». В целом полевыми наблюдениями охвачены 34 участка. По материалам исследований создана база данных. Результаты работ по проекту освещены в специальном выпуске Сибирского экологического журнала [Шишкин и др., 2014].

Кроме летних экспедиционных наблюдений по этому проекту в 2002–2004 г. выполнено исследование загрязнения снежного покрова с отбором проб и определением содержания и состава загрязняющих веществ (никеля, меди, других тяжелых металлов и серы) в образцах снега. Установлено, что большая часть загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу в виде пыли (90%), осаждается на подстилающую поверхность на расстоянии до 7 км от источников загрязнения, но они отмечаются и в радиусе 40 км, а в 2002 г. распространялись по долине Рыбной на 80 км. Загрязнители, поступающие в атмосферу в виде аэрозолей и газов, переносятся на значительные расстояния. Расчеты показывают, что только 2% выбросов серы осаждаются в радиусе 250 км, остальные включаются в глобальные геохимические циклы. На картах, составленных по результатам геохимических анализов проб снега, шлейф распространения водорастворимых форм серы с концентрацией более 200 кг/км² в год вытянут более чем на 100 км в северном направлении, а с концентрацией более 50 кг/км² в год более чем на 400 км в юго-восточном направлении от Норильска [Онучин и др., 2014].

Геохимическая оценка уровня загрязнения торфяных болот показала, что содержание тяжелых металлов проявляется вблизи промышленных предприятий Норильска и Талнаха, а воздействие под влиянием выбросов серы на большем расстоянии в болотных экосистемах долины р. Рыбной. Накопление тяжелых металлов и серы происходит в верхнем 5-сантиметровом (реже 15 см) слое торфяной залежи; глубже 30–35 см техногенные потоки не проникают [Ефремова, Ефремов, 2014]. На ключевых участках, удаленных от источника выбросов более чем на 80 км, поверхностное воздействие незначительно, но болота, расположенные в радиусе до 45 км от Норильска, подверглись сильному техногенному прессу [Карпенко, 2014].

По результатам натурных исследований почвенного покрова на эталонных участках выполнена экологическая оценка состояния почв. Выделены зоны: максимального загрязнения почв (с кларками концентрации тяжелых металлов и серы КК>10) на расстоянии от 3 до 30 км к югу, юго-востоку от Норильска и до 7–10 км к северу; умеренного загрязнения (КК 2–10) до 25 км к северо-западу и незагрязненные фоновые территории с КК < 2, удаленные на 40 км [Пономарева и др., 2014]. При исследованиях почвенного покрова подгольцового пояса плато Путорана в районе озер Кета, Лама и равнинной лесотундры в районе озера Большого влияние Норильского комбината не отмечено [Сеньков, 2014].

Значительно более широкое пространственное воздействие зафиксировано исследованиями состояния растительного покрова, для характеристики которого при участии

специалистов Центрального сибирского ботанического сада СО РАН по снимкам со спутника Landsat-7 и полевым описаниям составлена карта естественной растительности масштаба 1:200 000, охватывающая территорию от озера Пясино до Хантайского водохранилища. Эта детальная карта передает разнообразие растительности, представленное 17 ассоциациями, 9 союзами, 7 порядками, 6 классами; легенда карты включает 38 наименований с подробной характеристикой видового состава ассоциаций. Дополнительно выявлены антропогенные изменения и стадии деградации растительного покрова и составлена схема зон сильного, среднего и слабого антропогенного воздействия на растительность [Телятников, Пристяжнюк, 2014]. Это исследование показало, что под воздействием поллютантов формируются новые искусственные экосистемы, в которых снижено ценотическое и видовое разнообразие во всех группах высших и низших растений. Сокращение площади природных биоценозов ведет к уменьшению аккумуляции солнечной энергии и снижению первичной продуктивности [Телятников и др., 2014].

Для исследования ответной реакции лесных фитоценозов на техногенное воздействие, проявляющейся в ухудшении состояния и гибели древостоев с замещением лесных ассоциаций на более устойчивые комплексы, полевые работы проводились по трансектам в разных направлениях от комбината. В юго-восточном направлении на расстоянии от комбината 30–106 км характерно усыхание древостоев, отмирание кустарников. Гибель древостоя сопровождается трансформацией нижних ярусов, замещением лесных ассоциаций на тундровые и лугово-болотные комплексы. Растительность на трансектах в западном — юго-западном направлении на расстоянии 23–50 км испытала умеренные нарушения с сохранением зональных черт [Пименов и др., 2014].

На 4 эталонных участках по долине р. Рыбной на расстоянии от 22 до 85 км от комбината исследована динамика усыхания лиственницы сибирской. Дендрохронологическими методами определены даты гибели 268 деревьев. Гибель отдельных деревьев вблизи Норильска началась в 1940-х годах, сразу после ввода в эксплуатацию первых предприятий. Массовая гибель древостоев произошла в 1960-х, с вводом новых производств. На период 1975–1980 гг. приходится всплеск гибели лиственницы на расстоянии 85 км от комбината. К 2004 г. здесь только 23% деревьев оставались живыми. Величина радиального прироста годичных колец лиственницы свидетельствует о деградации роста перед полным разрушением древостоев. У отдельных оставшихся живыми деревьев отмечено некоторое увеличение прироста в конце 1990-х – начале 2000-х гг. Несмотря на это, при сохранении существующих темпов загрязнения лесоводы прогнозируют расширение зоны полностью погибших лесов [Кирдянов и др., 2014].

Для экстраполяции данных эталонных полевых наблюдений и лабораторных исследований на прилегающие территории выполнена классификация лесорастительных условий региона на основе цифровой модели рельефа SRTM и ландшафтных карт. По набору характеристик рельефа (высота, уклон, кривизна поверхности, экспозиция) выделено 8 классов сочетания элементов мезорельефа и с учетом информации о природно-климатических зонах классифицированы типы лесорастительных условий [Рыжкова и др., 2014].

По разновременным материалам со спутников Envisat/MERIS и SPOT/Vegetation выполнен анализ динамики состояния экосистем. В ГИС-анализ включены пространственные регрессионные модели содержания тяжелых металлов и серы в различных компонентах наземных экосистем. С опорой на эти материалы выполнена балльная оценка уровней загрязнения территории и степени нарушенности растительности; проведено экспертное зонирование территории по состоянию растительного покрова [Корец и др., 2014]. Выделены техногенные пустоши на расстоянии до 15 км от комбината, техногенные биоценозы в зоне удаления 20–90 км, умеренно (на расстоянии до 110 км) и слабо нарушен-

ные (до 140 км) природные экосистемы. Составленная карта нарушенности растительного покрова впервые четко зафиксировала границы 5 зон по этому показателю [Корец и др., 2014]. Однако сопоставление с предшествующими оценками площадей нарушений [Ковалев, 1994; Государственный..., 2004] показало их значительные расхождения, свидетельствующие о разном понимании исследователями категории «погибший лес».

Кроме экологической, дается и биогеохимическая оценка лесных экосистем в зоне влияния Норильского промышленного комплекса. Наземные исследования на ключевых участках на расстоянии от него от 22 до 85 км показали, что углероддепонирующая роль фитомассы уменьшается по градиенту загрязнения почти в 30 раз. Мертвый растительный материал выполняет роль сорбционного, седиментационного и механического барьера, где происходит концентрация тяжелых металлов и серы [Ведрова, Мухартова, 2014].

Не ограничиваясь материалами наземных исследований и экспертными оценками института леса, специалисты других институтов Сибирского отделения РАН (Ин-т биофизики, компьютерного моделирования) разрабатывали автоматизированные методы обработки материалов спутникового зондирования. Для исследования динамики притундровых лесов использовались временные серии изображений вегетационного индекса NDVI по данным радиометра AVHRR спутников TIROS/NOAA. Временные интервалы выбирались в соответствии с колебаниями уровня производства: 1976–1988 и 1995–2002 гг. Однако оказалось, что полученные по дистанционным материалам результаты расходятся с наземными данными. Осложнения в использовании NDVI связаны с тем, что для зоны сильного техногенного воздействия характерно появление на местах исчезновения лесов травяно-моховой растительности, а в зоне среднего воздействия происходит разрастание кустарниковой растительности, что искажает картину динамики лесов на основе NDVI [Shevyrnogov et al., 2008].

Материалы исследований красноярского Института леса в Норильском промышленном районе могут использоваться для разработки пакета нормативных документов, регламентирующих взаимоотношения между природопользователями и контролирующими экологическими службами. На их основе возможны также мероприятия по созданию устойчивых к выбросам ценозов [Шишкин и др., 2014]. В рамках этого проекта опробованы методы биологической рекультивации техногенных ландшафтов. В трех зонах разной степени нарушенности выполнена закладка экспериментальных культур. Выявлена достаточно высокая приживаемость черенков ивы, взятых в тех же районах, где проводится рекультивация. Сделан вывод о возможности проведения биологической рекультивации в условиях Норильского региона [Вараксин и др., 2014].

Важные концептуальные заключения сделаны в результате дендрохронологических исследований по проекту, проводившихся с целью датировки гибели древостоев. Прирост ширины годичных колец роста обычно следует за ходом температур; при потеплении, особенно сильно сказывающемся в Арктике, ширина колец увеличивается. Однако в зоне загрязнения комбината обнаружено уменьшение чувствительности деревьев к росту летних температур, замедление приращения ширины колец. Графики доли сохранившихся деревьев, хода температур и ширины годичных колец прироста показывают, что гибель деревьев вокруг Норильска началась уже в 1940-х гг., на 1970–1980-е приходится всплеск гибели. Но в 1940–1970-х гг. ширина годичных колец прироста изменялась синхронно с ростом летних температур воздуха, а после 1970 г., при продолжении повышения температур, ширина колец годового прироста стала уменьшаться. Кривые роста, смоделированные по значениям температур, и зафиксированные дендрохронологически по реальным спилам деревьев, расходятся, обозначилась «проблема дивергенции» в дендрохронологии. Она получила широкое обсуждение в научной литературе. По инициативе участников норильского проекта Института леса им. Сукачева появилась статья 25 авторов из России, Англии, Норвегии, Шве-

ции, Германии, Чехии, Швейцарии, США [Kirdyanov *et al.*, 2020], посвященная этим концептуальным последствиям исследований состояния растительности в районах техногенного загрязнения Арктики (рис. 2).

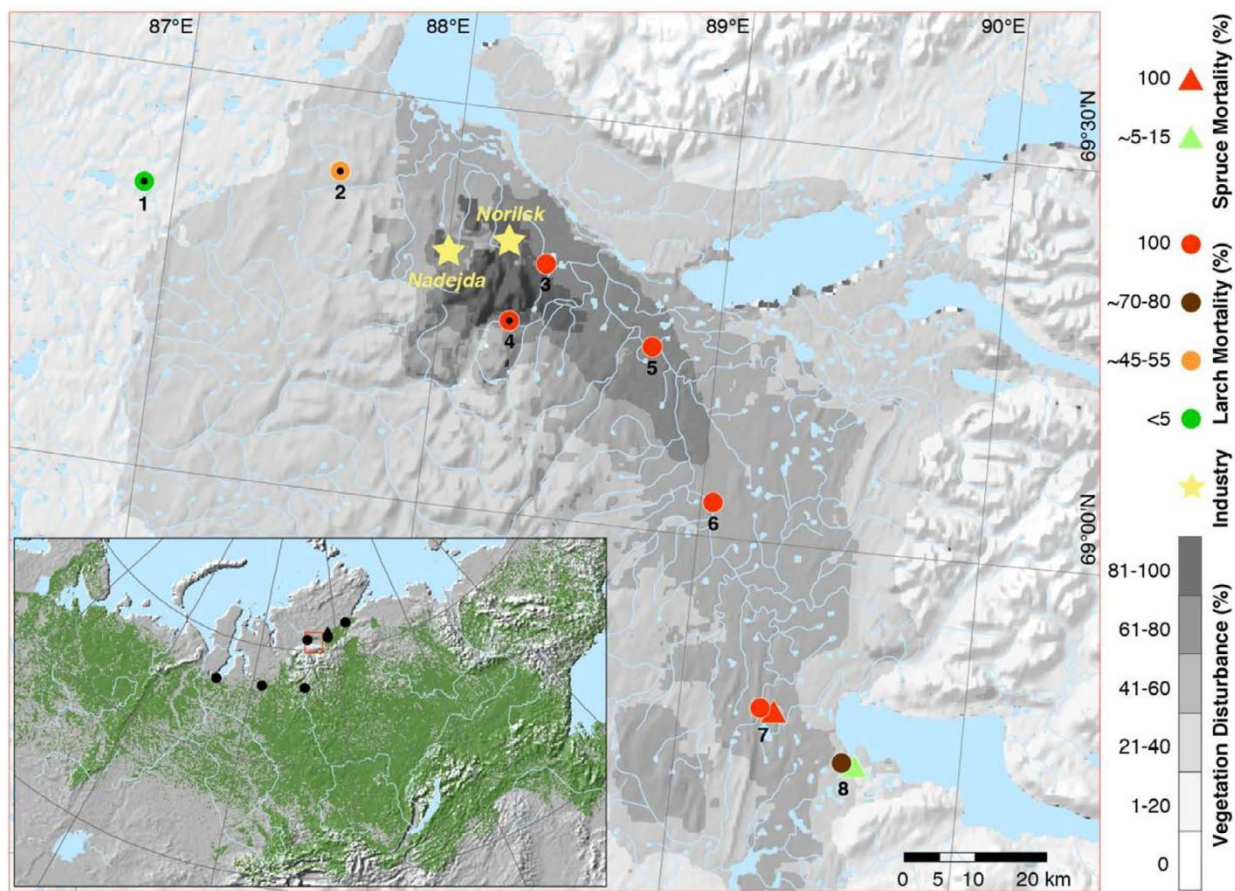


Рис. 2. Экологическая нарушенность в Норильском районе. Участки отбора проб лиственницы и ели (кружки и треугольники) наложены на районы деградации растительности (оттенки серого). Цвета и оттенки показывают % отмерших деревьев и нарушенности растительности. Кружки с черным центром: участки, где измерялся химический состав древесины. Красная рамка на карте-врезке показывает район Норильска в контексте бореальной лесной зоны России (зеленый цвет). Черные кружки (лиственница) и треугольник (ель) на врезке показывают незагрязненные эталонные участки, которые использовались в широкомасштабном моделировании процессов роста [Kirdyanov *et al.*, 2020]

Fig. 2. Environmental devastation in the Norilsk region. Larch and spruce sampling sites (dots and triangles, respectively) superimposed on different levels of vegetation degradation (grey shadings). Dots with black centres refer to the three sites for which wood chemistry was measured. The red frame in the inset map places the wider Norilsk study region in the context of Russia's boreal forest zone (green area). Black dots (larch) and one triangle (spruce) in the boreal inset map show non-polluted reference sites that have been used in the larger-scale, process-based forward modelling experiment [Kirdyanov *et al.*, 2020]

Второе десятилетие XXI века

Выявившееся в исследованиях начала XXI в. сложное, в ряде случаев разнонаправленное взаимодействие естественных природных изменений и техногенного вторжения в них, определило особенность современных исследований второго десятилетия этого века.

При оценке изменений геосистем становится значимой проблема соотношения климатических колебаний и антропогенного воздействия. В некоторых работах высказываются даже крайние предположения, что в условиях потепления климата, особенно заметного в Арктике, физические законы природных изменений в ряде случаев могут оказаться сильнее техногенного вторжения в функционирование геосистем [Macdonald, Harner, Fyfe, 2005].

Новое соотношение благоприятного для растительности климатического потепления и губительного техногенного воздействия в Арктике проявилось в диссертационном исследовании [Nyland, 2015, Nyland et al., 2017]. В обширном районе от озера Пясино до Хантайского водохранилища по разновременным снимкам со спутника Landsat за три периода: 1985–1987; 2000–2002; 2012–2014 гг., соответствующих изменению социально-экономических условий, проведена классификация с разделением 5 основных типов поверхности: вода; пустоши; тундра/редколесье; лес; застройка (рис. 3). Выполнен анализ изменений площадей их распространения. В целом в этом районе оказалось хорошо выраженным «позеленение Арктики» – обнаружено увеличение площадей лесов с 34% до 46%, главным образом за счет уменьшения площадей тундр/редколесий с 47% до 38%. Судя по этим результатам, рост площади лесов может быть обусловлен сгущением древостоев в редколесьях.

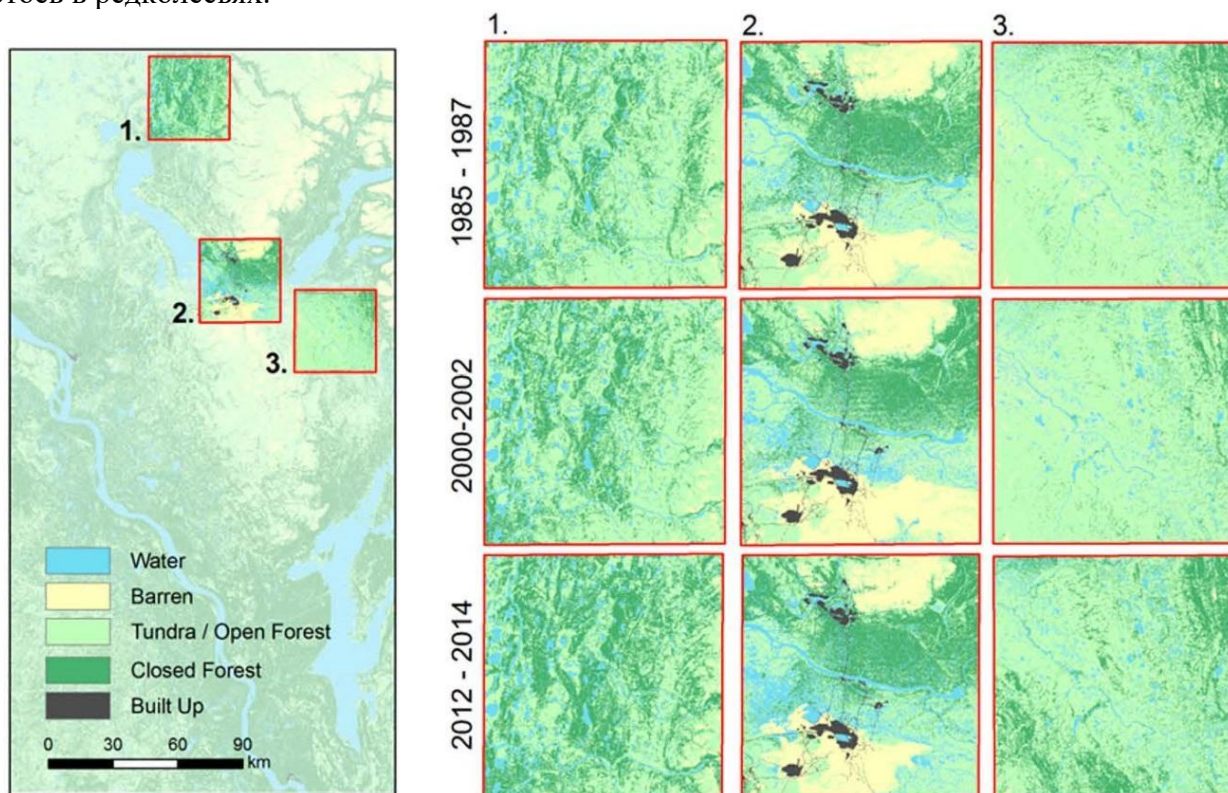


Рис. 3. Слева: карта региона исследований в низовьях Енисея и ключевые участки: 1) ненарушенная территория, 2) Норильск и его пригороды, 3) участок по основному пути загрязнения от воздушных выбросов Норильска. Справа: изменения на ключевых участках за три периода времени [Nyland et al., 2017]

Fig. 3. Left: map of the research region in the lower reaches of the Yenisei and key areas: 1) undisturbed territory, 2) Norilsk and its suburbs, 3) area along the main path of pollution from Norilsk air emissions. Right: changes at key sites over three time periods [Nyland et al., 2017]

Для выявления особенностей динамики экосистем в районах природных и техногенно обусловленных изменений такое же картографирование выполнено на трех небольших участках 50×50 км, расположенных в разных зонах: вне сферы воздействия комбината, вокруг него и в зоне наиболее сильного воздействия в долине р. Рыбной (рис. 3). За 30 лет, когда среднегодовая температура воздуха возросла с интенсивностью $0,06$ °C в год, на этих участках проявилось «озеленение Арктики», но по-разному. На участке вне зоны воздействия комбината площади лесов за 30 лет выросли на 17% за счет уменьшения площадей редколесий и тундр. На втором участке, охватывающем город с промышленными объектами, изменения не столь существенны и проявляются в увеличении площадей пустошей при сокращении тундр и редколесий, что вполне объяснимо при расширении производственных объектов. На третьем участке, в зоне интенсивного аэротехногенного воздействия дымов комбината к юго-востоку от него, в долине р. Рыбной, площади лесов в первый рассматриваемый период, до 2000-х гг., сокращались, а во второй увеличились, главным образом, за счет сокращения площадей редколесий и тундр.

Все оценки распространения растительности по космическим снимкам в этой и других работах базируются на значениях вегетационного индекса, и зафиксированный снимками переход категории «лиственный редколесье» в категорию «лес» в реальности обозначает не увеличение густоты древостоя, а увеличение зеленой массы растительности, в первую очередь нижнего яруса редколесий. Погибающие под влиянием дымов растения нижнего яруса освобождают место для заселения его видами, приспособившимися к воздействию – кустарничками, травянистыми растениями; в этом проявляется специфика вторичной сукцессии – восстановления растительности после гибели [Nyland *et al.*, 2017].

В конце второго десятилетия нашего века последовали исследования северной растительности, в частности, в районе Норильска, по российско-британскому проекту, в которых на основе данных новых суперкомпьютерных спутниковых сервисов (Google Earth Engine) и новых появившихся спутников, к изучению состояния растительности на основе вегетационного индекса удастся привлечь тысячи архивных и новых снимков, с использованием новейших технологий их обработки. Первые результаты этих работ обнаруживают озеленение растительности как за пределами, так и в зонах промышленного загрязнения и необходимость полевых, в первую очередь геоботанических, исследований происходящих изменений [Тутубалина *и др.*, 2020].

Одновременно в последние годы наблюдается интенсификация техногенных аварий на производственных предприятиях Норильска, в том числе в связи с большим износом инфраструктуры и оборудования, а также в связи с растеплением мерзлых грунтов. Так, 29 мая 2020 г. произошел масштабный разлив дизельного топлива объемом до 21 тыс. м³ из поврежденного резервуара на ТЭЦ-3 на Надеждинском комбинате, в результате произошло загрязнение грунта и вод в долинах рек Далдыкан и Амбарная в их нижнем течении [Трошко *и др.*, 2020], а также озера Пясино и предположительно р. Пясино. Также в 2020 г. и ранее наблюдались утечки сточных вод из нового Талнахского хвостохранилища [Костюченко, Козырев, 2020], а в начале 2021 г. произошли обрушения на Норильской обогатительной фабрике и затопление на крупнейших рудниках «Октябрьский» и «Таймырский» [Васильчук, Одиссонова, 2021]. Ожидается продолжение этих негативных тенденций в ближайшее время. Для оценки ущерба и разработки природоохранных мер при ликвидации разлива топлива в 2020 г. была организована Большая Норильская экспедиция (<https://www.sbras.ru/ru/bne2020>). При содействии различных организаций предстоит расширение работ по ликвидации последствий аварий и исследованию долгосрочного воздействия на природу в районе Норильска; настоящий обзор предназначен для информационной поддержки этих работ.

ВЫВОДЫ

Длительная история деятельности Норильского промышленного комплекса развивалась при разных уровнях его производственной мощности (а следовательно и воздействия на природную среду), определявшихся изменением собственности, и проходила в период потепления климата. Состояние природной среды зависит от соотношения этих изменяющихся техногенных и природных факторов.

Охарактеризованный выше первый этап изучения и картографирования повреждений растительности региона по космическим снимкам в конце XX в. пришелся на годы, когда изменение ее состояния (гибель лесов, деградация экосистем) определялось интенсивным и нарастающим техногенным воздействием, в сравнении с которым климатические колебания, уже начавшие проявляться, были не столь заметны.

Исследования, проведенные в начале XXI в., в период социально-экономических перемен и спада производства, при ускорившемся потеплении, позволили количественно охарактеризовать изменения наземных экосистем в зоне влияния Норильского комбината, где при продолжении их техногенной деградации начали проявляться процессы восстановления. Дендрохронологические исследования показали замедление роста деревьев в импактных зонах; выявлены особенности вторичных сукцессий арктической растительности под влиянием загрязнения.

Современные исследования второго десятилетия XXI в. показывают, что при действии климатического потепления, на участках вне зоны влияния комбината, наблюдается эффект позеленения, продвижение лесной растительности на север и повышение границы леса в горах. На участках в районе промышленного влияния и в подветренных зонах аэротехногенного загрязнения продолжается расширение техногенных пустошей на месте лесов, уничтоженных выбросами сернистого газа и тяжелых металлов, увеличение зон загрязнения вод и почв вблизи хвостохранилищ и промышленных объектов. Но это сопровождается маргинальным повторным восстановлением растительности, преимущественно кустарниковой, более устойчивой к загрязнению, что составляет особенность процессов вторичной сукцессии. Изучение этих процессов должно опираться на опыт и результаты предшествующих исследований; эту задачу и решает настоящий обзор.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по проекту РФФИ 18-05-60221.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out with support of the RFBR project 18-05-60221.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белая Е.Г., Горшков С.П., Мельников Д.В.* Эколого-географическая карта Норильского региона. Масштаб 1:500000. Пояснительная записка к научно-справочной эколого-географической карте Российской Федерации масштаба 1: 4000000. Под редакцией О.А. Евтеева и Л.Ф. Январевой. М.: Изд-во МГУ, 1996. С. 34–37.
2. *Вараксин Г.С., Кузнецова Г.В., Евграфова С.Ю., Шанченкова О.А.* Опыт биологической рекультивации техногенных ландшафтов в Норильском промышленном районе. Сибирский экологический журнал. 2014. №6. С. 1039–1047.
3. *Варенцов М.И., Константинов П.И., Самсонов Т.Е., Ретина И.А.* Изучение феномена городского острова тепла в условиях полярной ночи с помощью экспериментальных измерений и дистанционного зондирования на примере Норильска. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014. Т. 11. № 4. С. 329–337.

4. *Васильчук Т., Одиссонова В.* Период распада «Норникеля». Катастрофа длиной в 25 лет. Теперь секретны даже имена погибших. Новая газета. 2021. № 28. 17 марта.
5. *Ведрова Э.Ф., Мухортова Л.В.* Биогеохимическая оценка лесных экосистем в зоне влияния Норильского промышленного комплекса. Сибирский экологический журнал, 2014. №6. С. 933–944.
6. *Горшков С.П.* Ландшафтно-геоэкологическое картографирование Норильского района экологического бедствия. Изменение природной среды. Глобальный и региональный аспекты. Под ред. А.Н. Геннадиева и Е.В. Милановой. М.: Изд-во МГУ, 1997. С. 148–161.
7. *Гребенец В.И., Юров Ф.Д., Толманов В.А., Хайрединова А.Г.* Формирование техногенных каменных глетчеров из отвалов породы в горнодобывающих районах. Сергеевские чтения. Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2019. Вып. 21. С. 394–399.
8. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2003 г.». Главное управление охраны природных ресурсов и окружающей среды МПР России по Красноярскому краю. Красноярск. 2004. 218 с.
9. *Ефремова Т.Т., Ефремов С.П.* Эколого-геохимическая оценка уровней загрязнения тяжелыми металлами и серой бугристых торфяников юга Таймыра. Сибирский экологический журнал, 2014. № 6. С. 965–974.
10. *Карпенко Л.В.* Современное состояние торфяной залежи болот лесотундровой подзоны Красноярского края и геохимическая оценка ее загрязнения. Сибирский экологический журнал, 2014. №6. С. 953–964.
11. *Кирдянов А.В., Мыглан В.С., Пименов А.В., Кнорре А.А., Экарт А.К., Ваганов Е.А.* Динамика усыхания лиственницы сибирской в зоне влияния техногенных эмиссий предприятий Норильского промышленного района. Сибирский экологический журнал, 2014. № 6. С. 945–952.
12. *Ковалев Б.И.* Мониторинг состояния лесов в условиях аэротехногенного воздействия Норильского промышленного района. Лесное хозяйство, 1994. №3. С. 42–45.
13. *Корец М.А., Рыжкова В.А., Данилова И.В.* Использование ГИС для оценки состояния наземных экосистем Норильского промышленного района. Сибирский экологический журнал, 2014. №6. С. 887–902.
14. Космические методы геоэкологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 104 с.
15. *Костюченко Е., Козырев Ю. Ржавчина.* Как «Норникель» перерабатывает Таймыр в чистую прибыль. Специальный репортаж. Новая газета. 2020. № 74. 15 июля.
16. *Онучин А.А., Буренина Т.А., Зубарева О.Н., Трофимова О.В., Данилова И.В.* Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района. Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 1025–1037.
17. *Мельников Ю.О., Ржаницын П.В., Яковлев А.О.* Геолого-экологическое картирование масштаба 1: 1000000 Норильского района, лист R-45-B, Г в 1991–1995 гг. Норильск: Норильская комплексная геолого-разведочная экспедиция, АО «Норильский горно-металлургический комбинат им. А.П. Завенягина»; Норильский Никель, 1996.
18. *Пименов А.В., Ефимов Д.Ю., Первунин В.А.* Топо-экологическая дифференциация растительности в Норильском промышленном районе. Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 923–931.
19. *Пономарева Т.В., Трофимова О.В., Богородская А.В., Шапченкова О.А.* Эколого-функциональная оценка состояния почв в зоне аэротехногенного воздействия Но-

- рильского промышленного комплекса. Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 987–996.
20. Росгидромет. Отчет о климате России в 2013 г. М.: Гидрометиздат, 2014. 68 с.
 21. *Рыжкова В.А., Данилова И.В., Корец М.А.* Классификация лесорастительных условий Норильского района и прилегающих территорий для оценки состояния и динамики растительного покрова. Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 873–885.
 22. *Сеньков А.А.* Особенности почвенного покрова подгольцового пояса плато Путорана. Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 845–854.
 23. *Филипчук А.Н., Ковалев Б.И.* Динамика усыхания предтундровых лесов в Норильском промышленном районе. Межд. симп. "Северные леса: состояние, динамика, антропогенное воздействие" (Москва, 16–26 июля 1990 г.). М.: 1990. С. 29–37.
 24. *Телятников М.Ю., Банаев Е.В., Онучин А.А., Шишкин А.С.* Характеристика природных экосистем и основных дестабилизирующих факторов севера Центральной Сибири. Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 803–806.
 25. *Телятников М.Ю., Пристяжнюк С.А.* Антропогенное влияние предприятий Норильского промышленного района на растительный покров тундры и лесотундры. Сибирский экологический журнал, 2014. №6. С. 903–922.
 26. *Трошко К.А., Денисов П.В., Лаврова О.Ю., Лулян Е.А., Медведев А.А.* Наблюдение загрязнений реки Амбарной, возникших в результате аварии на ТЭЦ-3 города Норильска 29 мая 2020 г. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020. Т. 17. №3. С. 267–274.
 27. *Тутубалина О.В., Голубева Е.И., Зимин М.В., Кравцова В.И., Михайлов Н.В., Железный О.М.* Картографирование состояния растительного покрова в окрестностях г. Норильска с помощью Google Earth Engine. Материалы восемнадцатой Всероссийской открытой конференции с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 16–20 ноября. 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 373. DOI 10.21046/18DZZconf-2020a.
 28. *Шишкин А.С., Абаимов А.П., Онучин А.А.* Методология и принципы организации исследований природных экосистем в регионах с экстремальным техногенным воздействием. Сибирский экологический журнал, 2014. №6. С. 863–871.
 29. *Харук В.И., Винтерберг К., Цыбульский Г.М., Яхимович А.П., Мороз С.Н.* Техногенное повреждение притундровых лесов Норильской долины. Экология, 1996. № 6. С. 424–429.
 30. *Щелкунова Р.П.* (ред.) Карта растительности и кормовых запасов Хатангского района Таймырского национального округа на основе геоботанических исследований 1964–1967 гг. Масштаб 1:500 000. 1974. М.: Картографический филиал института Росгипрозем.
 31. *Anisimov O., Kokorev V., Zhil'tsova Y.* Temporal and spatial patterns of modern climatic warming: Case study of northern Eurasia. Climatic Change. 2013. V. 118(3–4). P. 871–883.
 32. *Eythorssona D., Gardarssona S.M., Ahmadb S.K., Hossainb F., Nijssenb B.* Arctic climate and snow cover trends – Comparing Global Circulation Models with remote sensing observations. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation. 2019. No 80. P. 71–81.
 33. *Grebenets V.I., Savchenko V.A.* Problems of Creations of Underground Constructions in Towns of Cryolitozone. Proceedings of the 6th International Conference «Underground Space and Urban Planning». Paris, 1995.
 34. *Humphreys D.* Challenges of transformation: The case of Norilsk Nickel. Resources Policy. 2011. V. 36. P. 142–148.

35. *Khokhar M.F., Frankenberg C., Van Roozendaal M., Beirle S., Kuhl S., Richter A., Platt U., Wagner T.* Satellite observations of atmospheric SO₂ from volcanic eruptions during the time-period of 1996–2002. *Advances in Space Research*. 2005. V. 36. P. 879–887.
36. *Kirdyanov A.V., Krusic P.J., Shishov V.V., Vaganov E.A., Fertikov A.I., Myglan V.S., Barinov V.V., Browse J., Esper J., Ilyin V.A., Knorre A.A., Korets M.A., Kukarskikh V.V., Mashukov D.A., Onuchin A.A., Piermattei A., Pimenov A.V., Prokushkin A.S., Ryzhkova V.A. Shishikin A.S., Smith K.T., Taynik A.V., Wild M., Zorita E., Bu€ntgen U.* Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution. *Ecology Letters*, 2020.
37. *Klein D.R. Vlasova T.J.* Lichens, a unique forage resource threatened by air Pollution. *Rangifer*, 1992. No 12. P. 21–27
38. *Kozlov, M.V., Zvereva, E.L.* Industrial barrens: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2007. No 6. P. 233–259.
39. *Luo J., Han Y., Zhao Y., Liu X., Huang, Wang L., Chen K., Tao Sh., Liu J., Ma J.* An inter-comparative evaluation of PKU-FUEL global SO₂ emission inventory. *Science of the Total Environment*. 2020. No 722. P. 137755.
40. *Macdonald R.W., Harnerb T.T., Fyfe J.* Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. *Science of the Total Environ Ment*. 2005. No 342. P. 5–86.
41. *Nyland K.E.* Climate- and Human- Induced Land Cover Change and its Effects on the Permafrost System in the Lower Yenisei River of the Russian Arctic. A Thesis submitted to the Faculty of the Columbian College of Arts and Sciences of the George Washington University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Arts. 2015.
42. *Nyland K.E., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A.* Climatic- and anthropogenic-induced land cover change around Noril'sk, Russia. *Polar Geography*. 2017. No 40 (4). P. 257–272.
43. *Shevyrnogov A., Vysotskaya G. Sidko A. Dunaev K.* Typification of natural seasonal dynamics of vegetation to reveal impact of land surface change of environment (by satellite data). *Advances in Space Res.* 2000. V. 26. No 7. P. 1169–1172.
44. *Shevyrnogov A., Vysotskaya G., Sukhinin A., Frolikova O., Tchernetsky M.* Results of analysis of human impact on environment using the time series of vegetation satellite images around large industrial centers. *Advances in Space Research*. 2008. V. 41. 36–40.
45. *Streets D.G., Canty T., Carmichael G.R., de Foy B., Dickerson R.R., Duncan B.N., Edwards D.P., Haynes J.A., Henze D.K., Houyoux M.R., Jacob D.J., Krotkov N.A., Lamsal L.N., Liu Y., Lu Z., Martin R.V., Pfister G.G., Pinder R.W., Salawitch R.J., Wecht K.J.* Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current Capability. *Atmospheric Environment*. 2013. V. 77. P. 1011–1042.
46. *Toutoubalina O.V., Rees W.G.* Remote sensing of industrial impact on Arctic vegetation around Noril'sk, northern Siberia: preliminary results. *International Journal of Remote Sensing*. 1999. V. 20. P. 2979–2990.
47. *Tutubalina O.V., Rees W.G.* Vegetation degradation in a permafrost region as seen from space: Noril'sk 1961–1999. *Cold Regions Science and Technology*. 2001. V. 32. P. 191–203.
48. *Vlasova T.M., Kovalev B.I., Filipchuk A.N.* Effects of point source atmospheric pollution on boreal-forest vegetation of northwestern Siberia. National Park Service, Anchorage, AK, USA. No AD-P=007320/5/XAB (1992).

49. *Walter D., Heue K.-P., Rauthe-Schöch A., Brenninkmeijer C.A.M., Lamsal L.N., Krotkov N.A., Platt U.* Flux calculation using CARIBIC DOAS aircraft measurements: SO₂ emission of Norilsk. *Journal of Geophysical Research*. 2012. V. 117. D11305.
50. *Zotin A., Zuev D., Kashkin V., Kurako M., Simonov K.* Environmental risk zones mapping using satellite monitoring data. *Procedia Computer Science*. 2018. V. 126. P. 1597–1605.

REFERENCES

1. *Belaya E.G., Gorshkov S.P., Melnikov D.V.* Ecological and geographical map of the Norilsk region. Scale 1: 500000. Explanatory note to the scientific-reference ecological-geographical map of the Russian Federation at a scale of 1: 4000000. Edited by O.A. Evteev and L.F. Yanvareva. M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1996. P. 34–37 (in Russian).
2. *Varaksin G.S., Kuznetsova G.V., Evgrafova S.Yu., Shanchenkova O.A.* Experience of biological reclamation of technogenic landscapes in the Norilsk industrial region. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. V. 6. P. 1039–1047 (in Russian).
3. *Varentsov M.I., Konstantinov P.I., Samsonov T.E., Repina I.A.* Study of the phenomenon of urban heat island under polar night conditions using experimental measurements and remote sensing on the example of Norilsk. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2014. V. 11. No 4. P. 329–337 (in Russian).
4. *Vasilchuk T., Odissonova V.* Period of disintegration of "Norilsk Nickel". A catastrophe 25 years long. Now even the names of the victims are secret. *Novaya Gazeta*, No 28 of March 17, 2021 (in Russian).
5. *Vedrova E.F., Mukhortova L.V.* Biogeochemical assessment of forest ecosystems in the zone of influence of the Norilsk industrial complex. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 933–944 (in Russian).
6. *Gorshkov S.P.* Landscape-geoecological mapping of the Norilsk region of ecological disaster. *Changes in the natural environment. Global and regional aspects*. Ed. A.N. Genadiev and E.V. Milanova. M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1997. P. 148–161 (in Russian).
7. *Grebenets V.I., Yurov F.D., Tolmanov V.A., Khayredinova A.G.* Formation of technogenic stone glaciers from rock dumps in mining areas. *Sergeevskie readings. Ecological and economic balance of nature management in mining regions*. Perm: Perm. un-t., 2019. V. 21. P. 394–399 (in Russian).
8. State report "On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2003". Main Directorate for the Protection of Natural Resources and the Environment of the Ministry of Natural Resources of Russia for the Krasnoyarsk Territory. Krasnoyarsk, 2004. 218 p. (in Russian).
9. *Efremova T.T., Efremov S.P.* Ecological and geochemical assessment of the levels of pollution by heavy metals and sulfur in hilly peatlands in the south of Taimyr. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 965–974 (in Russian).
10. *Karpenko L.V.* The current state of the peat deposit of the bogs of the forest-tundra subzone of the Krasnoyarsk Territory and the geochemical assessment of its pollution. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 953–964 (in Russian).
11. *Kirdyanov A.V., Myglan V.S., Pimenov A.V., Knorre A.A., Ekart A.K., Vaganov E.A.* The dynamics of Siberian larch drying in the zone of influence of technogenic emissions from enterprises of the Norilsk industrial region. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 945–952 (in Russian).
12. *Kovalev B.I.* Monitoring of the state of forests in the conditions of aerotechnogenic impact of the Norilsk industrial region. *Forestry*, 1994. No 3. P. 42–45 (in Russian).

13. *Korets M.A., Ryzhkova V.A., Danilova I.V.* The use of GIS for assessing the state of terrestrial ecosystems of the Norilsk industrial region. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 887–902 (in Russian).
14. *Space methods of geocology*. M.: Izd-vo Mosk. Un-ta, 1998. 104 p. (in Russian).
15. *Kostyuchenko E., Kozyrev Y. Rzhavchina*. How Norilsk Nickel Converts Taimyr Into Net Profit. Special report. *Novaya Gazeta*. 2020. No 74. July 15 (in Russian).
16. *Onuchin A.A., Burenina T.A., Zubareva O.N., Trofimova O.V., Danilova I.V.* Pollution of the snow cover in the zone of influence of the enterprises of the Norilsk industrial region. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 1025–1037 (in Russian).
17. *Melnikov Yu.O., Rzhanitsyn P.V., Yakovlev A.O.* Geological and ecological mapping at a scale of 1: 1,000,000 of the Norilsk region, sheet R-45-B, G in 1991–1995. Norilsk: RAO Norilsk Nickel, 1996 (in Russian).
18. *Pimenov A.V., Efimov D.Yu., Pervunin V.A.* Topo-ecological differentiation of vegetation in the Norilsk industrial region. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. V. 6. P. 923–931 (in Russian).
19. *Ponomareva T.V., Trofimova O.V., Bogorodskaya A.V., Shapchenkova O.A.* Ecological and functional assessment of the state of soils in the zone of aerotechnogenic impact of the Norilsk industrial complex. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. No 6. P. 987–996 (in Russian).
20. *Roshydromet*. Russian Climate Report 2013. 2014. 68 p. (in Russian).
21. *Ryzhkova V.A., Danilova I.V., Korets M.A.* Classification of forest growing conditions of the Norilsk region and adjacent territories for assessing the state and dynamics of vegetation cover. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. V. 6. P. 873–885 (in Russian).
22. *Senkov A.A.* Features of the soil cover of the subalpine belt of the Putorana Plateau. *Siberian Journal of Ecology*, 2014. V. 6. P. 845–854 (in Russian).
23. *Filipchuk A.N., Kovalev B.I.* The dynamics of drying out of pre-tundra forests in the Norilsk industrial region. Int. symp. "Northern forests: state, dynamics, anthropogenic impact" (Moscow, July 16–26, 1990). M.: 1990. P. 29–37 (in Russian).
24. *Telyatnikov M.Yu., Banaev E.V., Onuchin A.A., Shishikin A.S.* Characteristics of natural ecosystems and the main destabilizing factors of the north of Central Siberia. *Siberian Journal of Ecology*. 2014. V. 6. P. 803–806 (in Russian).
25. *Telyatnikov M.Yu., Prist'yazhnyuk S.A.* Anthropogenic influence of the enterprises of the Norilsk industrial region on the vegetation cover of the tundra and forest-tundra. *Siberian Journal of Ecology*. 2014. V. 6. P. 903–922 (in Russian).
26. *Troshko K.A., Denisov P.V., Lavrova O.Yu., Lupyay E.A., Medvedev A.A.* Observation of pollution of the Ambarnaya River caused by the accident at CHPP-3 in the city of Norilsk on May 29, 2020. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2020. V. 17. No 3. P. 267–274 (in Russian).
27. *Tutubalina O.V., Golubeva E.I., Zimin M.V., Kravtsova V.I., Mikhailov N.V., Zhelezny O.M.* Mapping the state of vegetation in the vicinity of Norilsk using Google Earth Engine. *Materials of the Eighteenth All-Russian Open Conference with International Participation "Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*. November 16–20. 2020. IKI RAN, 2020. P. 373. DOI 10.21046. 18DZZconf-2020a (in Russian).
28. *Shishikin A.S., Abaimov A.P., Onuchin A.A.* Methodology and principles of organizing research on natural ecosystems in regions with extreme technogenic impact. *Siberian Journal of Ecology*. 2014. No 6. P. 863–871 (in Russian).
29. *Kharuk V.I., Winterberg K., Tsybul'sky G.M., Yakhimovich A.P., Moroz S.N.* Technogenic damage to the tundra forests of the Norilsk Valley. *Ecology*, 1996. No 6. P. 424–429 (in Russian).

30. *Shchelkunova R.P.* (ed.) Map of vegetation and forage reserves of the Khatanga region of the Taimyr national district based on geobotanical studies in 1964–1967. Scale 1: 500,000. 1974. M.: Cartographic branch of the Rosgiprozem Institute (in Russian).
31. *Anisimov O., Kokorev V., Zhil'tsova Y.* Temporal and spatial patterns of modern climatic warming: Case study of northern Eurasia. *Climatic Change*, 2013. 118(3–4). P. 871–883.
32. *Eythorssona D., Gardarssona S.M., Ahmadb S.K., Hossainb F., Nijssenb B.* Arctic climate and snow cover trends – Comparing Global Circulation Models with remote sensing observations. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*. 2019. No 80. P. 71–81.
33. *Grebenets, V.I., Savchenko, V.A.* Problems of Creations of Underground Constructions in Towns of Cryolitozone. Proceedings of the 6th International Conference «Underground Space and Urban Planning». Paris, 1995.
34. *Humphreys D.* Challenges of transformation: The case of Norilsk Nickel. *Resources Policy*. 2011. No 36. P. 142–148.
35. *Khokhar M.F., Frankenberg C., Van Roozendaal M., Beirle S., Kuhl S., Richter A., Platt U., Wagner T.* Satellite observations of atmospheric SO₂ from volcanic eruptions during the time-period of 1996–2002. *Advances in Space Research*, 2005. No 36. P. 879–887.
36. *Kirdyanov A.V., Krusic P.J., Shishov V.V., Vaganov E.A., Fertikov A.I., Myglan V.S., Barinov V.V., Browse J., Esper J., Ilyin V.A., Knorre A.A., Korets M.A., Kukarskikh V.V., Mashukov D.A., Onuchin A.A., Piermattei A., Pimenov A.V., Prokushkin A.S., Ryzhkova V.A. Shishikin A.S., Smith K.T., Taynik A.V., Wild M., Zorita E., Bu€ntgen U.* Ecological and conceptual consequences of Arctic pollution. *Ecology Letters*, 2020.
37. *Klein, D.R. Vlasova, T. J.* Lichens, a unique forage resource threatened by air Pollution. *Rangifer*, 1992. V. 12. P. 21–27.
38. *Kozlov M.V., Zvereva E.L.* Industrial barrens: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2007. No 6: 233–259.
39. *Luo J., Han Y., Zhao Y., Liu X., Huang, Wang L., Chen K., Tao Sh., Liu J., Ma J.* An inter-comparative evaluation of PKU-FUEL global SO₂ emission inventory. *Science of the Total Environment*. 2020. 722, 137755.
40. *Macdonald R.W., Harnerb T.T., Fyfe J.* Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. *Science of the Total Environ Ment*. 2005. V. 342. P. 5–86.
41. *Nyland K.E.* Climate- and Human- Induced Land Cover Change and its Effects on the Permafrost System in the Lower Yenisei River of the Russian Arctic. A Thesis submitted to the Faculty of the Columbian College of Arts and Sciences of the George Washington University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Masters of Arts. 2015.
42. *Nyland K.E., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A.* Climatic- and anthropogenic-induced land cover change around Norilsk, Russia. *Polar Geography*, 2017. No 40 (4). P. 257–272.
43. *Shevyrnogov A., Vysotskaya G. Sidko A. Dunaev K.* Typification of natural seasonal dynamics of vegetation to reveal impact of land surface change of environment (by satellite data). *Advances in Space Res.* 2000. V. 26. No 7. P. 1169–1172.
44. *Shevyrnogov A., Vysotskaya G., Sukhinin A., Frolikova O., Tchernetsky M.* Results of analysis of human impact on environment using the time series of vegetation satellite images around large industrial centers. *Advances in Space Research*, 2008. V. 41. P. 36–40.
45. *Streets D.G., Canty T., Carmichael G.R., de Foy B., Dickerson R.R., Duncan B.N., Edwards D.P., Haynes J.A., Henze D.K., Houyoux M.R., Jacob D.J., Krotkov N.A., Lamsal L.N., Liu Y., Lu Z., Martin R.V., Pfister G.G., Pinderm R.W., Salawitch R.J., Wecht K.J.*

- Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current Capability. *Atmospheric Environment*. 2013. V. 77. P. 1011–1042.
46. *Toutoubalina O.V., Rees W.G.* Remote sensing of industrial impact on Arctic vegetation around Noril'sk, northern Siberia: preliminary results. *International Journal of Remote Sensing*. 1999. No 20. P. 2979–2990.
 47. *Tutubalina O.V., Rees W.G.* Vegetation degradation in a permafrost region as seen from space: Norilsk 1961–1999. *Cold Regions Science and Technology*. 2001. V. 32. P. 191–203.
 48. *Vlasova T.M., Kovalev B.I., Filipchuk A.N.* Effects of point source atmospheric pollution on boreal-forest vegetation of northwestern Siberia. National Park Service, Anchorage, AK, USA, No AD-P=007320/5/XAB (1992).
 49. *Walter D., Heue K.-P., Rauthe-Schöch A., Brenninkmeijer C.A.M., Lamsal L.N., Krotkov N.A., Platt U.* Flux calculation using CARIBIC DOAS aircraft measurements: SO₂ emission of Norilsk. *Journal of Geophysical Research*, 2012. V. 117. D11305.
 50. *Zotin A., Zuev D., Kashkin V., Kurako M., Simonov K.* Environmental risk zones mapping using satellite monitoring data. *Procedia Computer Science*. 2018. V. 126. P. 1597–1605.
-