

Критика и библиография

УДК 551.2/3

Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения земель¹

© 2013 г. В.Р. Алексеев

Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, Якутск;

Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

Snow@irk.ru

Статья принята к печати 25 октября 2012 г.

Геоэкология, гляциоиндикация, загрязнение земель, загрязнение снежного покрова, исследование Земли из космоса, снег.
Geocology, glacio-indication, pollution of lands, snow cover pollution, remote studies from space, snow.

Освещаются итоги работ по изучению загрязнённого снежного покрова на космических снимках, вокруг городов и транспортных магистралей на территории Российской Федерации, в зарубежных странах и на континентах, полученные российскими учёными В.Г. Прокачевой и В.Ф. Усачевым в последние 30 лет и представляющие собой фундаментальный вклад в гляциологию и геоэкологию. Рассматривается вопрос о постановке специальных подспутниковых наблюдений и исследований, направленных на совершенствование методики гляциоиндикации загрязнённых земель и определение количественных характеристик загрязнителей.

Введение

Снег, такой привычный и такой загадочный, никого не оставляет равнодушным. Его любят, им наслаждаются, используя в самых разных ипостасях, но и опасаются, а то и вовсе страшатся, обращаясь к разным способам защиты и противодействия. «Снег-друг» и «снег-враг» — прописные истины. Учёные знают, что снег — величайший источник информации, своеобразное зеркало событий прошлого и свидетель настоящего. Обнаружить и прочесть информацию, скрытую в шестиугольной снежинке, в структуре стратиграфической колонки, на поверхности свежеснежавшего, метелевого или старого и лежалого снега — непростая задача. Это предмет важного научного направления — гляциоиндикации природных процессов и явлений. В последние годы гляциоиндикация приобрела большое значение, особенно в связи с глубоким бурением ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии, а также бурением скважин на горных ледниках Кавказа, Сибири и некоторых других районов мира. Благодаря ледяным кернам появилась возможность восстанавливать историю климата, состав атмосферы, время вулканических извержений и др. Серийные космические снимки земной поверхности, на которых хорошо фиксируется загрязнённый снежный покров, открыли широкие возможности для оценки экологического состояния нашей планеты.

Известно, что кристаллы снега загрязняются уже в процессе своего образования за счёт поглощения мелких частиц (ядер кристаллизации), взвешенных в атмосфере. В значительной степени насыщение снега инородным веществом происходит и при его выпадении, когда сублимационные кристаллы, сталкиваясь друг с другом, образуют хлопья; при этом они захватывают, переносят и осаждают аэрозольные элементы. Поэтому воздух во время снегопадов и после них становится чистым. При сильном загрязнении атмосферы возможно выпадение грязного или цветного снега, но это случается редко — всё зависит от содержания и состава загрязняющих веществ в надземном пространстве. С увеличением толщины снежного покрова на поверхности Земли загрязнённость снега возрастает: она становится тем больше, чем выше концентрация в воздухе оседающих между снегопадами загрязнителей и чем длиннее зимний период. Наиболее сильное загрязнение снега происходит в результате пыльных бурь, лесных пожаров, извержений вулканов, а также под влиянием деятельности человека. Различают фоновое загрязнение снега, обусловленное осаждением взвешенных частиц на большой территории (оно определяется общей циркуляцией и взаимодействием атмосферы с поверхностью Земли), и локальное, возникающее вокруг наземных источников загрязне-

¹Обзор исследований российских учёных В.Г. Прокачевой и В.Ф. Усачева.

ния, образующих ореолы повышенного содержания ингредиентов в снежной толще.

Характеристики снежного покрова в зоне активной деятельности человека всегда существенно отличаются от фоновых значений. Вокруг городов, промышленных центров, сельских поселений, вдоль железных и автомобильных дорог и многих других объектов инфраструктуры формируются ореолы загрязнения местности. Выпавшие на поверхность снега частицы при очередных снегопадах переходят в погребённое состояние, а поверхность снега становится относительно чистой, повышается её отражательная способность; при метелях загрязнители смешиваются с измельчёнными при сальтации ледяными кристаллами, размывая и расширяя границы загрязнённости. Оседающие вещества достаточно хорошо фиксируются в разрезе снежной толщи, подчёркивая её слоистость. Зная время выпадения зимних осадков, можно установить дату выброса вредных веществ, а анализируя пробы снега по всему разрезу, определить состав, количество и динамику их накопления в холодный период года.

Ореолы загрязнения местности отражаются на аэрокосмических снимках, особенно в период снеготаяния, и позволяют фиксировать экологически неблагоприятные ситуации одновременно и на больших пространствах. Это обстоятельство выяснилось при анализе материалов первых телевизионных съёмок с искусственных спутников Земли и послужило основанием для постановки широкомасштабных исследований по оценке кумулятивного (суммарного) загрязнения земель на территории России, других государств и на континентах в целом. Работа была начата по инициативе сотрудников Государственного гидрологического института (г. Санкт-Петербург) В.Г. Прокачевой и В.Ф. Усачева в рамках программы лаборатории аэрокосмических методов исследований ещё в 1971 г. и с некоторыми перерывам продолжается до сих пор. За это время дешифрировано огромное количество как отечественных, так и зарубежных снимков, полученных с ИСЗ, выполнены расчёты, обработка и анализ собранных данных. В итоге подготовлены и опубликованы монография [10], серия справочников [2, 3, 11–15] и несколько статей [5, 7, 9]. К сожалению, тиражи этих работ небольшие — 50–100 экземпляров. Большинство из них сразу после выхода в свет из печати стали библиографической редкостью и фактически оказались недоступны широкому кругу потребителей. Именно поэтому возникла необходимость сделать обзор результатов выполненных исследований и оценить полученную информацию с позиций современных задач гляциологии и геоэкологии. Работы под руководством и при непосредственном участии В.Г. Прокачевой и В.Ф. Усачева выполняли в несколько этапов.

Этап I. Разработка методики оценки загрязнённости снежного покрова и земель (1971–1989 гг.)

В 1970-е годы перед исследователями стояла скромная задача — выяснить причины аномального затемнения снежного покрова вокруг городов и вдоль дорог и использовать телевизионные снимки с ИСЗ для изучения влияния урбанизации на режим весеннего половодья и загрязнение водных потоков в районах предполагаемого пионерного освоения территории. При анализе снежного покрова на снимках городов Караганды, Омска, Воркуты, Норильска и некоторых других был сделан важный вывод о перспективности использования космической информации для решения многих вопросов гидрологии. Однако вскрылось и много неясного в происхождении ореолов, способах их измерения, методах обработки данных, их интерпретации. Тем не менее, первый опыт использования спутниковых изображений принёс положительный результат и нашёл отражение в специальном издании [1], где, кроме методических рекомендаций по дешифрированию снимков и картографированию ореолов загрязнения, дана программа дальнейших работ, направленных на оценку особенностей разрушения устойчивого снежного покрова в очагах интенсивного выброса вредных веществ.

Комплекс подспутниковых наземных и авиационных исследований, поставленных в районе городов Воркуты (1978 г.), Мончегорска и Апатиты (1980 г.), Орла и Нерюнгри (1981 г.), Ленинграда (1982 г.) и др., растянулся почти на 15 лет. Одновременно с экспедиционными наблюдениями вели опытно-экспериментальные работы на стационарных участках, где имитировалось естественное загрязнение снега, определялись его свойства, фиксировались особенности стратификации и процессы разрушения. Важное значение приобрели совместные исследования с немецкими учёными в районе Ильичево под Ленинградом (1982, 1984, 1985, 1987 г.) и в горах Гарца (ГДР), для проведения которых немецкая сторона выделила многоканальный спектрофотометр. С помощью этого прибора определялись коэффициенты яркости снежного покрова — чистого, в естественном состоянии, и при искусственном запылении. Результаты работ, опубликованные в совместном издании [19], позволили более обоснованно дешифрировать космические материалы, провести их анализ и математическую обработку.

В 1980–1985 гг. в лаборатории появилось большое число космоснимков высокого разрешения, полученных системой ИСЗ «Метеор-Природа» и предоставленных региональными вычислительными центрами Москвы, Новосибирска и Хабаровска. Началось широчайшее исследование состояния снежного покрова в зоне влияния городских агломераций и транспортных систем. Изучена территория вокруг 540 городов Совет-

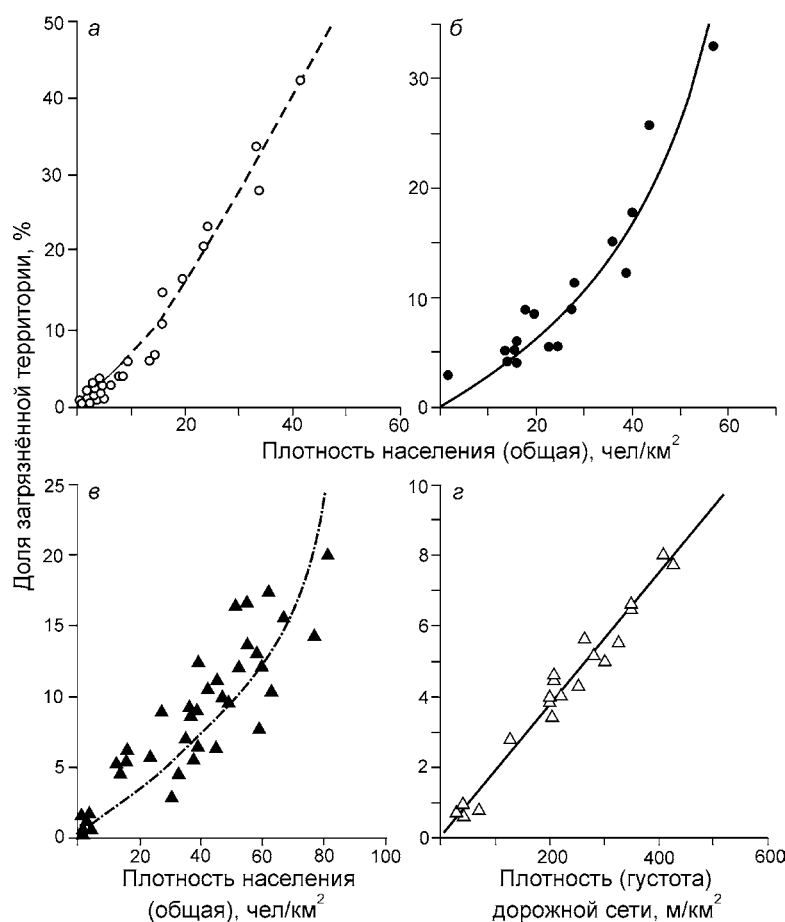


Рис. 1. Примеры корреляции размеров загрязнённой территории с плотностью населения (а–в) и густотой дорожной сети (г) для субъектов Российской Федерации [3]:

а – с преобладанием загрязняющих видов промышленности (металлургия, химия и нефтехимия, цементная, теплоэнергетика, добыча полезных ископаемых); б – средний уровень развития промышленности (машиностроение, деревообработка, легкая, пищевая); в – крупные культурные центры, средние и малые города административного, рекреационного назначения

Fig. 1. Correlation of the size of polluted territory with population density (a–в) and with road network density (г) for subjects of the Russian Federation [3]: a – kinds of the polluting industry predominating (metallurgy, chemistry and petrochemistry, cement industry, heat power industry, and mining); б – mean level of industrial development (mechanical engineering, woodwork and timber industry, and light and food industry); в – large cultural centers, medium-sized and small administrative and recreational cities

ского Союза с численностью населения более 50 тыс. человек. В изданном Каталоге ореолов загрязнения [2] систематизированы сведения о пространственно-временной изменчивости снежного покрова (приведены табличные данные и мелкомасштабные карты продолжительности, образования, разрушения и схода устойчивости снежного покрова), дан обзор климатических предпосылок загрязнения снега, впервые приведены графики зависимости площади и модуля загрязнения снега от численности населения в городе.

Примечательно, что в целях исключения погрешностей все снимки дешифрировал один высококвалифицированный специалист. Результаты его работы представлены на 540 картограммах, на которых, кроме контуров зоны загрязнения, вынесены также розы ветров по восьми румбам в зимний период с устойчивым снежным покровом. Характеристика ореолов загрязнения приведена в таблице, где указаны численность населения в городе, площадь пятна застройки, площадь загрязнения, форма ореола (наибольшая длина, коэффициент формы, удалённость границ от геометрического центра населённого пункта) и др. Согласно приведённым материалам, площади загрязнённых окрестностей городов в среднем в 30 раз больше площади пятна застройки, площади ореолов

загрязнения колеблются от 40 км² до 180 тыс. км², при этом на каждого жителя города в среднем приходится около 6 км² загрязнённых земель [2].

Полученный опыт исследований был обобщён в монографии [6]. Эта книга стала первым научным произведением, на мой взгляд основополагающим, в котором с исчерпывающей полнотой определены принципы использования индикационных свойств снежного покрова при решении задач глобальной геоэкологии, описана методика получения данных и показана её эффективность при исследовании больших территорий. Доказано, что городская и промышленная инфраструктуры – основные и мощные источники загрязняющих веществ, которые, концентрируясь в снеге, сильно изменяют радиационные свойства снежной толщи, её динамику и функциональное значение в развитии пригородных геосистем. Главнейшее достижение этих исследований – выявленная статистическая зависимость площади загрязнённых земель по городам от численности населения, видов промышленного производства и густоты дорожной сети (рис. 1). Все связи имеют удовлетворительное качество с коэффициентами корреляции от 0,85 до 0,90. Графики отличаются универсальностью, поскольку позволяют определить долю загрязнённых земель для всей

территории района исследований, а при необходимости установить и абсолютный размер этих земель. Полученные зависимости в дальнейшем легли в основу оценки загрязнённости земель в областях без постоянного снежного покрова. Итоги работ докладывались на бюро Научного совета по космическим исследованиям АН СССР под председательством акад. К.Я. Кондратьева и получили высокую оценку.

Выход в свет этой монографии [6] определил направление дальнейших исследований. Возникла необходимость усовершенствования методики получения данных в зависимости от местоположения источников загрязнения, размера и структуры водосборов, ландшафтно-географических особенностей местности и ряда других факторов. Встал вопрос о расширении работ по идентификации видов и структуры загрязнителей, выяснении путей их миграции, роли осадков и водных потоков в перераспределении и аккумуляции. Требовалось также изменить техническое обеспечение полевых и лабораторных работ.

Этап II. Оценка загрязнения земель по государствам и континентам (1990–2002 гг.)

Однако скоро ситуация круто изменилась. Начавшаяся социально-политическая перестройка страны не позволила завершить начатые исследования в плановом порядке — сначала снизилось финансирование, сократилось оперативное обеспечение спутниковой информацией, прекратились полевые работы, а затем мирно прекратила существование и сама лаборатория. Руководители остались одни, без коллектива. Правда, к этому времени уже появились компьютеры и интернет, которые фактически спасли положение дел. В.Г. Прокачев и В.Ф. Усачев, опираясь на архивные данные и новую съёмочную информацию, начали создавать продукцию прикладного характера — справочники, каталоги, обзоры. В относительно короткий срок учёные подготовили серию справочников о хронически загрязняемых землях вокруг городских поселений и вдоль дорог: по России (1992), Республикам Казахстан и Беларусь (1992), по Литве, Латвии и Эстонии (1993), Монголии и Китаю (1993), Украине и Молдавии (1994), по губерниям Финляндии (1995), по воеводствам Польши, областям Словакии и Чехии, землям Германии, Швеции, Дании и Норвегии (1997), по административным единицам Исландии, Ирландии и Великобритании (2001), а также по странам Североамериканского континента — США и Канаде (2001). В 1997–1999 гг. оценена загрязнённость водосборных территорий в бассейнах Балтийского, Чёрного и Каспийского морей. В ходе этой работы определены масштабы загрязнения в Австрии, Румынии, Болгарии, Венгрии, Югославии, Грузии, Азербайджане, Армении, Туркменистане, частично в Иране, Турции, Швейцарии, Италии и

Албании. В работе, как и прежде, использовался проверенный алгоритм — прямое дешифрирование космических снимков и последующие расчёты ореолов загрязнения снега в пределах урбанизированных территорий. Таким образом была создана уникальная база данных по городам и транспортным магистралям 35 «холодных» государств мира. К сожалению, составленные справочники не опубликованы, но значительная их часть депонирована в ВИНТИ [4, 8, 16–18] и с ними можно ознакомиться на сайте Государственного гидрологического института <http://www.hydrology.ru/depart/dep/lgis/>.

Одновременно у учёных возникла мысль раздвинуть границы информационного поиска — оценить загрязнённость всего земного шара. Но как это сделать? Ведь снежный покров не образуется в тропиках и пустынях. Казалось, применение метода гляциоиндикации ограничится лишь странами с суровыми климатическими условиями. Однако учёные нашли простое и эффективное решение — при отсутствии необходимых съёмок снежного покрова использовать метод «обратной зависимости»: зная численность населения в городе, структуру промышленного производства, климатические характеристики местности и некоторые другие параметры, можно найти площадь ореола загрязнения. Для этого использовались графики связи, построенные при обобщении данных для более 1000 городских поселений в зонах субарктического и бореального климата. Погрешность таких расчётов не превышала 15%. Общая схема определения загрязнённых площадей при отсутствии отображения снега на космических снимках показана на рис. 2. При оценках загрязнения анализировалась дополнительная информация: учитывалась концентрация производства, преобладающая форма городского расселения, функциональные типы городских поселений, занятость населения в различных видах хозяйствования, величина валового внутреннего продукта, структура импорта и экспорта и др. Изучались атласы, словари, энциклопедии, карты, статистические сборники и другие справочные материалы по всем странам мира. Оценка загрязнённости земель земного шара завершилась в 2002 г. В результате в сводный каталог [10] помещены сведения по 221 административному субъекту. Фактические расчёты выполнены по 193 государствам и 41 подопечной территории. Полученные данные позволили составить достаточно полную картину хронической загрязнённости нашей планеты (рис. 3).

Общая загрязнённость Земли по регионам и частям света показана в табл. 1. Из неё видно, что продолжительному загрязнению подвержены 13 606 тыс. км² (10% суши). Это — катастрофическая цифра, если учесть, что именно на этой загрязнённой территории проживает основная часть населения.

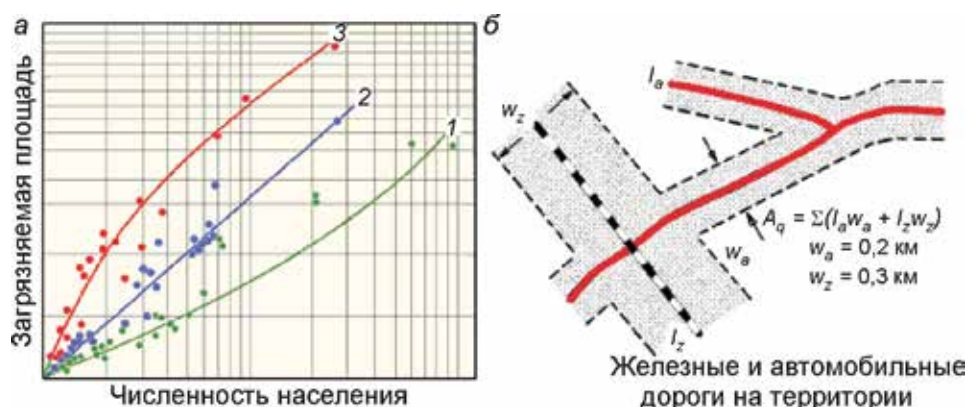


Рис. 2. Схема определения размеров загрязняемых площадей вокруг городских поселений (а) и вдоль дорог (б) при отсутствии материалов съёмки [9, 10]:

1 – крупные культурные центры, средние и малые города административного, рекреационного назначения; 2 – города и посёлки со средним уровнем развития промышленности (машиностроение, деревообработка, лёгкая, пищевая); 3 – города и посёлки с сильно загрязняющими видами промышленности (металлургия, химия и нефтехимия, цементная, теплоэнергетика, добыча полезных ископаемых); A_q – суммарная загрязняемая площадь вдоль дорог на административной территории (уезд, область, государство); l_a и l_z – соответственно протяжённость автомобильных и железных дорог; w_a и w_z – соответственно средняя ширина загрязняемой полосы вдоль автомобильных и железных дорог

Fig. 2. The scheme for determining polluted areas around urban settlements (a) and along roads (b) in the absence of survey data [9, 10]. 1 – large cultural centers, and medium-sized and small administrative and recreational cities; 2 – cities and settlements with a mean level of industrial development (mechanical engineering, woodwork and timber industry, and light and food industry); 3 – cities and settlements with heavily polluting kinds of industry (metallurgy, chemistry and petrochemistry, cement industry, heat power industry, and mining of minerals); A_q – total polluted area along roads on an administrative territory (uyezd, oblast, state); l_a and l_z – length of motor roads and railroads, respectively; w_a and w_z – mean width of the polluted zone along motor roads and railroads, respectively

К наиболее неблагополучным регионам относятся Западная Европа, Микронезия и страны Карибского бассейна. На их территориях площадь загрязнённых земель равна 44,5; 33,3 и 31,1% соответственно. Меньше всего загрязнены Австралия с Новой Зеландией (2,1%), Меланезия (3,1%) и Центральная Африка (3,8%). Площадь загрязнённых земель по государствам колеблется в широких пределах – от 10 км² до 2400 тыс. км². Чем больше территория страны, тем больше в ней загрязнённых земель. В категорию с площадью загрязнения более 200 тыс. км² вошли 11 государств. Среди лидеров – Китай (2400 тыс. км²), Индия (1460 тыс. км²), США (1156 тыс. км²), Россия (683 тыс. км²) и Бразилия (657 тыс. км²). Небольшие по площади страны – Великобритания и Япония, а также территориальные гиганты – Канада и Австралия вместе с 33 другими государствами оказались в категории 50–200 тыс. км². В градацию менее 2 тыс. км² попали 69 государств и подопечных территорий.

Этап III. Оценка загрязнения земель по водосборам и субъектам Российской Федерации (2003–2011 гг.)

Исследования ежегодного загрязнения земель в масштабах всего Земного шара принесли авторам большое моральное удовлетворение, однако выполненная работа не получила ожидаемого резонанса в научном мире. Видимо, нужна была соответствующая

информация – не на уровне самиздата и недостаточно читаемого фонда ВИНТИ, а путём публикации обзорно-аналитических статей в рейтинговых отечественных и зарубежных журналах. Надо было использовать и средства массовой информации: умная реклама научных достижений иногда приносит неожиданно хорошие результаты. Увы, не случилось. Между тем в России произошли существенные перемены. Рыночная экономика, несмотря на её многие негативные стороны, активизировала решение актуальных проблем рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды. Возникли необходимость и возможность продолжить работу на новом технологическом уровне. К этому времени детальность изображения земной поверхности на космических снимках, сделанных спутниками нового поколения, существенно повысилась. Многозональные съёмки позволили выделять полутоновую кайму на границе чистого снежного покрова, что существенно облегчало выделение ореолов загрязнения вокруг источников выброса вредных веществ. В интернете на сайте <http://rapid-fire.sci.gsfc.nasa.gov/realtime/> Американское космическое агентство NASA и Геологическая служба США (Customer Services U.S. Geological Survey Earth Resources Observation Sloux Falls – EROS) стали выкладывать ежедневные космические снимки (Terra/Aqua – MODIS) с разрешением 2000–200 м.

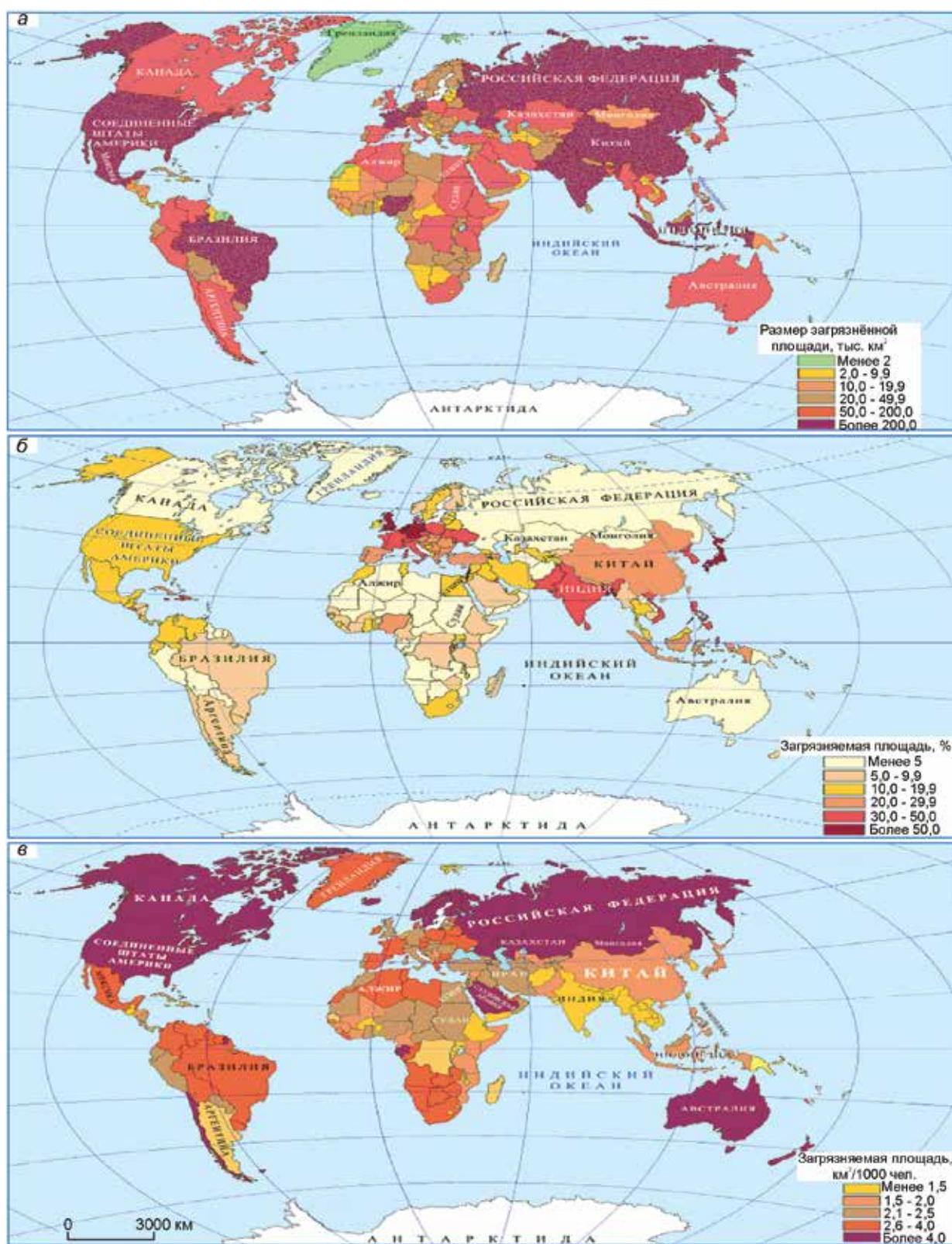


Рис. 3. Загрязнённость Земли по государствам, определённая методом гляциоиндикации [10]:
 а – абсолютная, км²; б – относительная, в % от площади государства; в – загрязнённая площадь, приходящаяся на 1000 человек, км² (per capita)

Fig. 3. The degree of the Earth pollution for the particular states as determined by the method of glacio-indication [10]:
 а – absolute, км²; б – relative, in % of a state's area; в – polluted area, corresponding to 1000 persons, км² (per capita)

Таблица 1. Характеристики техногенно-загрязняемых земель по частям света и регионам [10]

Части света, регионы	Площадь, 1000 км ²	Население, млн чел.	Загрязнённая площадь		
			1000 км ²	%	км ² на 1000 чел.
<i>Азия:</i>	31 764	3723	6304	19,8	1,7
Восточная	11 762	1472	2729	23,2	1,8
Южная	10 776	1514	2266	21,0	1,5
Юго-Восточная	4495	538	820	18,2	1,5
Западная	4731	199	489	10,3	2,4
<i>Америка:</i>	42 050	833	3009	7,2	3,6
Северная	21 517	304	1316	6,1	4,3
Южная	17 819	351	1243	7,0	3,5
Латинская	20 533	528	1692	8,2	3,2
Карибский бассейн	235	38	73	31,1	1,9
Центральная Америка	2480	140	377	15,2	2,7
<i>Африка:</i>	30 306	818	1790	5,9	2,2
Восточная	6356	241	403	6,3	1,7
Центральная	6613	97	254	3,8	2,6
Северная	8525	186	477	5,6	2,6
Южная	2675	57	189	7,1	3,3
Западная	6138	237	467	7,6	2,0
<i>Антарктида</i>	13 975		0,5	0,004	
<i>Европа:</i>	22 986	738	2314	10,0	3,1
Восточная	18 813	312	1150	6,1	3,7
Северная	1749	95	288	16,5	3,0
Южная	1316	147	383	29,1	2,6
Западная	1107	184	493	44,5	2,7
<i>Океания:</i>	8537	31	190	2,2	6,1
Австралия и Новая Зеландия	7984	23	170	2,1	7,3
Меланезия	541	7	17	3,1	2,7
Микронезия	3	0,6	1,0	33,3	1,8
Полинезия	9	0,7	1,1	12,6	1,5
<i>Всего</i>	135 641	6143	13 606	10,0	2,2

Кроме того, открылся быстрый и бесплатный (!) доступ к архивным и оперативным снимкам с ИСЗ «LANDSAT» [<https://earthexplorer.usgs.gov/>] (рис. 4). Как не воспользоваться новыми возможностями для расширения и углубления исследований?

Вначале В.Г. Прокачева и В.Ф. Усачев выполнили расчёты суммарного загрязнения земель по всем субъектам и федеральным округам, оработали гидрографический аспект [11], а затем исследовали очаги загрязнения по административным районам и речным бассейнам федеративных округов России – Северо-Западному [12], Уральскому [13], Сибирскому [14] и Дальневосточному [15]. Эти направления работ диктовали новые реалии, возникшие в результате распада СССР, реформирования и деления страны на укрупнённые административные единицы. Возникла необ-

ходимость определения степени загрязнения земель по частям крупных речных бассейнов, входящих в соседние государства и смежные субъекты Российской Федерации, а также внутри краёв, областей и республик «в разрез» естественным природным границам – водоразделам. Использовались как новые, так и архивные материалы. Для проверки размеров загрязнённых земель 15-летней давности и соответствующей их корреляции по принципам прямой и обратной связи был реализован региональный подход, предусматривающий учёт современных статистических данных о плотности населения и типах расселения, развитии промышленности и дорожной сети, величине валового регионального продукта (ВРП) и других факторов. Новые построенные графики связи площади загрязняемых земель с плотностью городского

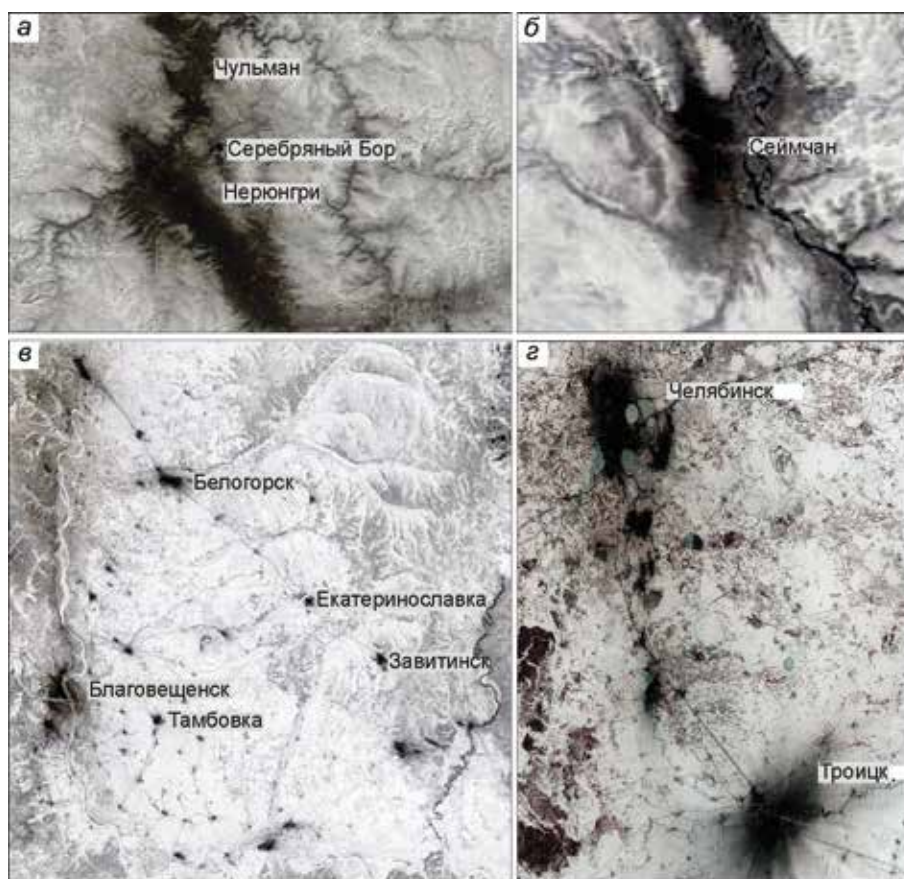


Рис. 4. Изображения загрязнённого снежного покрова, полученные с искусственных спутников Земли. Снимки с ИСЗ Terra/Aqua – MODIS с разрешением 250 м: *а* – г. Нерюнгри и его окружение в Южной Якутии, 29 апреля 2011 г.; *б* – пгт. Сеймчан в Магаданской области, 13 мая 2011 г.; *в* – район Транссибирской железнодорожной магистрали, 25 марта 2011 г. [5]; *г* – снимок с ИСЗ «LANDSAT» 5–6 апреля 2011 г., города Челябинск и Троицк на Урале (синтез каналов 4-3-2, разрешение 30 м) [14]

Fig. 4. Satellite images of the polluted snow cover.

«Terra» – Modis satellite mages with 250 m resolution: *a* – city of Neryungri and its surroundings in Southern Yakutia, April 29, 2011; *b* – urban-type settlement of Seimchan in Magadan oblast, May 13, 2011; *v* – area of the Trans-Siberian Railroad, March 25, 2011 [5]; *z* – «Landsat» image on April 5–6, 2011, city of Chelyabinsk and city of Troitsk on Ural (synthesis of channels 4-3-2, 30 m resolution) [14]

населения и густотой железных и автомобильных дорог оказались вполне удовлетворительного качества, с коэффициентами корреляции 0,85–0,90. Погрешность при сравнении расчётных данных и натурных измерений составила не более 10%.

Результаты определения общей загрязнённости земель по семи федеральным округам и субъектам РФ представлены авторами в табличной форме, а также отражены на картах, примеры которых приведены на рис. 5. В таблицах по каждому объекту указаны площадь территории, плотность населения, доля городского населения, значение ВРП, густота дорожной сети, площадь загрязнённой территории (в км² и %), площадь загрязнённых земель, приходящаяся на 1000 человек (per capita), роль дорог в общем загрязнении (%). Соотношение суммарной площади загрязнения земель по федеральным округам показано на рис. 6. Видно, что наибольшая площадь загрязнённой территории (28%) – в Сибирском федеральном округе, а наименьшая – в Дальневосточном (6%).

Детальная (порайонная) оценка загрязнённости земель выполнена пока лишь по четырём округам России, но есть надежда, что эта работа в ближайшее время будет продолжена и по другим округам. Большое значение её очевидно, в частности, в связи с актуальными задачами муниципальных органов по

обустройству жизненного пространства в новых социально-экономических условиях. Опубликованные В.Г. Прокачевой и В.Ф. Усачевым последние четыре справочника [12–15] отличаются от предыдущих объёмом, детальностью информации, большим количеством графиков, аналитическим содержанием. Публикуемые материалы получены на основе изучения космоснимков, имеющихся на момент составления справочников. Например, для справочника по Дальневосточному округу просмотрены американские снимки Terra/Aqua – MODIS за 2001–2010 гг., а также ежедневные съёмки в период снеготаяния, растянувшегося в регионе с 9 февраля по 10 июня 2011 г.

Гидрологическое значение загрязнённости снежного покрова и земель оценивалось суммарно по бассейнам рек Атлантического, Северного Ледовитого и Тихого океанов, отдельно по бассейнам внутренних морей Евразии – Балтийского, Белого, Каспийского, Чёрного, Азовского, по бассейнам крупных озёр – Ладожского, Онежского, Чудско-Псковского, Байкала, Ханка, а также по крупным административным единицам России и смежным государствам в границах соответствующих водосборов. Суммарная загрязнённость крупных речных бассейнов отражена на карте (рис. 7). Наибольшая площадь загрязнённых земель (237 тыс. км²) установлена в бассейне р. Обь;

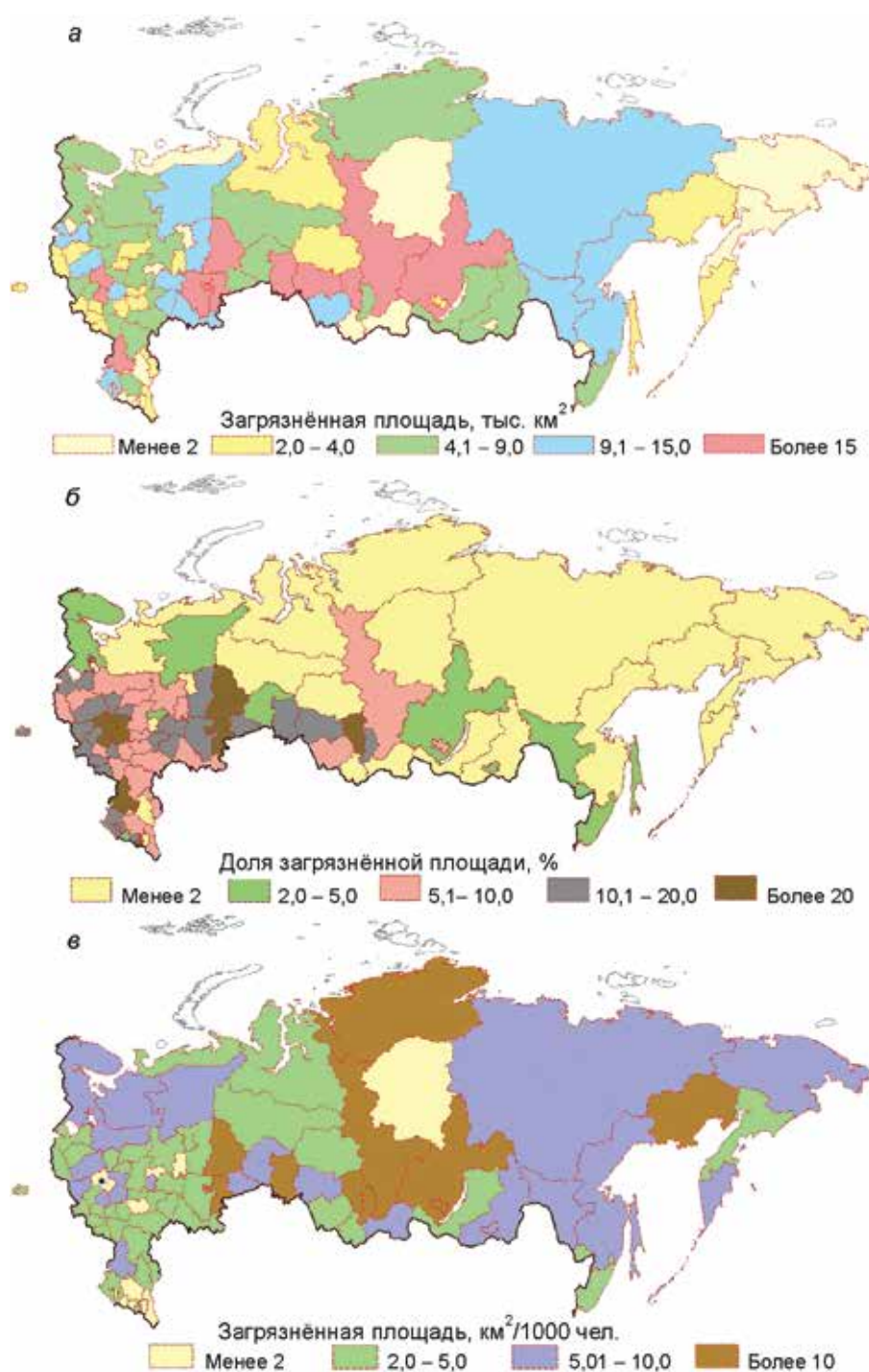


Рис. 5. Загрязнённость земель субъектов Российской Федерации, определённая методом гляциоиндикации [12].

Усл. обозначения см. рис. 3

Fig. 5. The degree of pollution of subjects of the Russian Federation as determined by the method of glacio-indication [12].

Captions see at Fig. 3

20% этих земель находятся в Казахстане, 70% — в России. Меньше всего загрязнён бассейн р. Лена. Здесь хроническому загрязнению подвергается всего 9 тыс. км². Загрязнённые территории располагаются преимущественно в районах добычи каменного угля,

алмазов и золота. Не обнаружены на космоснимках следы загрязнения в бассейнах рек Нижней Таймыры, Анабара, Пенжины, Алазеи, Уды (Охотской). В целом загрязнённость бассейнов крупных рек уменьшается с запада на восток (см. рис. 7).

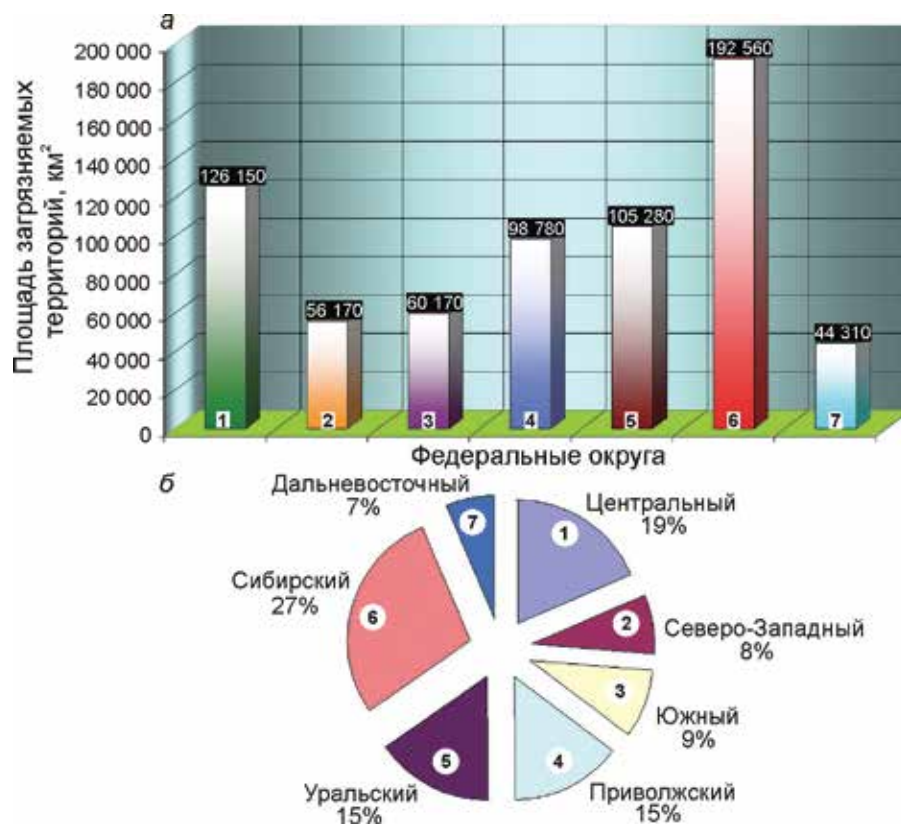


Рис. 6. Распределение загрязнённых земель в Российской Федерации по федеральным округам (цифры 1–7) [14]:

a – в абсолютных значениях, км²; *б* – в % от площади федерального округа

Fig. 6. The distribution of polluted lands in the Russian Federation for federal okrugs (numbers 1–7) [14]:

a – in absolute values, км²; *б* – in % of the area of a federal okrug

Авторы провели сравнительный анализ данных, полученных по снимкам разных лет, начиная с 1990 г. Оказалось, что общая загрязнённость территории, определённая методом гляциоиндикации, за 15 лет (с 1990 по 2005 г.) снизилась на 5%, а доля загрязнённых земель – на 0,3%. Установлена неоднородность пространственно-временной изменчивости загрязнения по отдельным округам и субъектам Российской Федерации. Так, в 2000–2010 гг. площадь загрязнённых земель сократилась на территории Республики Саха (Якутия) на 41%, в Хабаровском крае на 50%, в Магаданской области на 64%, а на Чукотке и в Еврейской автономной области, наоборот, увеличилась соответственно на 22 и 5% (табл. 2). Вскрытую многолетнюю тенденцию к уменьшению загрязнённости территории России авторы объясняют сокращением численности населения, снижением эффективности и темпов развития промышленного производства, перестройкой транспортной инфраструктуры и некоторыми другими причинами. В ряде мест техногенные нагрузки оставались стабильными или существенно повысились, что связано с передислокацией источников загрязнения, увеличением числа автомобильного транспорта, развитием дорожной сети, горнодобывающей промышленности, ростом объёма бытовых отходов и др.

Совокупность выполненных исследований позволила авторам сделать оптимистический вывод

об общем состоянии жизненного пространства нашей страны: «Россия богата не только полезными (для всего мира) ископаемыми, но также богата чистыми, не загрязненными пока землями» [15, с. 19]. Действительно, земли Российской Федерации загрязнены всего на 4%. По сравнению со многими странами мира – это величайшее благо. Для сравнения: в США загрязнено 12% территории государства, в Италии – 47%, в Германии – 57%, в Великобритании – 60%. Чистые земли России находятся на севере Сибири и Дальнего Востока. Они труднодоступны и дискомфортны по условиям проживания. Хорошо это или плохо? Вероятнее всего, хорошо, потому что не тронутые урбанизацией территории, не только российские, служат своеобразными химчистками нашей планеты.

Обсуждение результатов исследований

Прогрессивная часть общества уже давно обеспокоена экологическим состоянием Земли и судьбой цивилизации. Растут численность населения, промышленное производство, потребление природных ресурсов, распахиваются степи, вырубаются и горят леса, расширяются пустыни и дурные земли. Человечество всё негативнее воздействует на природные системы, вынуждая их приспосабливаться к меняющейся обстановке, которая скоро выйдет за рамки

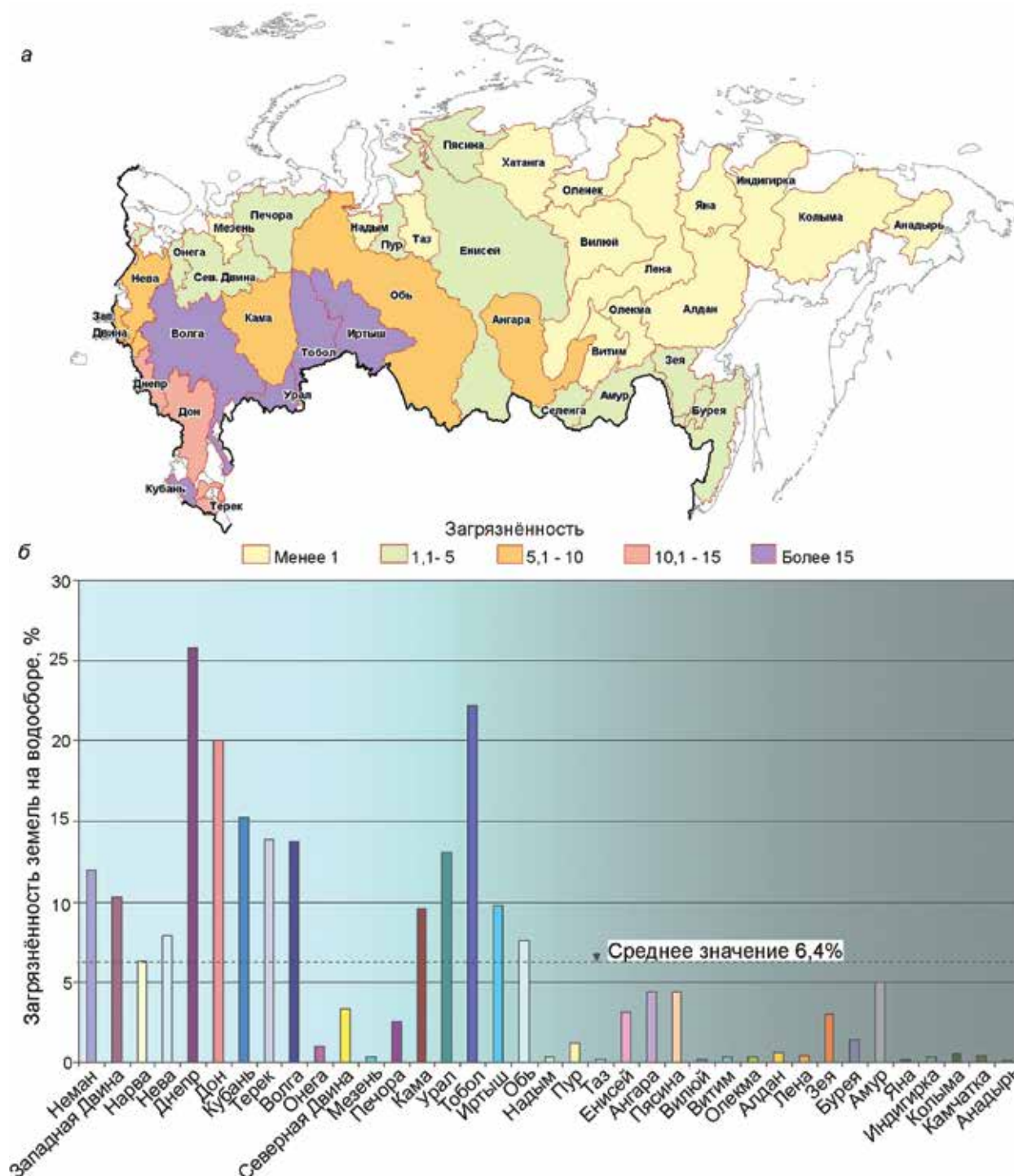


Рис. 7. Загрязнённость земель Российской Федерации в бассейнах крупных рек (в % от площади водосборов) [14]:

а – площадное распределение; **б** – гистограмма, отражающая снижение загрязнённости с запада на восток

Fig. 7. The degree of pollution of lands of the Russia Federation (in % of the catchment areas) [14]:

a – areal distribution; **b** – histogram representing the decrease in pollution from west to east

естественного хода событий. Объём загрязняющих веществ вместе с численностью населения Земного шара увеличивается катастрофически быстро, и пока нет возможности остановить этот процесс, хотя он

грозит необратимо опасными событиями-катаклизмами. В такой напряжённой экологической ситуации важно знать истинное положение вещей, т.е. владеть максимально возможной объективной

Таблица 2. Тенденция изменения площади загрязнённых земель в Дальневосточном федеральном округе с 1990 по 2010 г. [15]

Субъекты округа	Загрязнение земель, годы				
	1992	2004	1990–2000	2010	2000–2010
	тыс. км ²		%	тыс. км ²	%
Республика Саха (Якутия)	10,1	9,0	–11	5,3	–41
Камчатский край	2,6	2,3	–11	1,3	–43
Приморский край	6,8	6,4	–6	5,2	–19
Хабаровский край	10,0	9,5	–5	4,7	–50
Амурская область	11,2	9,3	–17	6,1	–34
Магаданская область	3,7	3,3	–11	1,2	–64
Сахалинская область	3,6	3,1	–14	2,3	–26
Еврейская автономная область	1,05	0,96	–9	1,01	+5
Чукотский автономный округ	0,53	0,45	–15	0,55	+22
<i>Всего</i>	49,6	44,3	–11	27,7	–37

информацией об объёме, путях и процессах загрязнения геосистем разного уровня иерархии, чтобы принимать правильные и своевременные решения. В общем виде экологическое состояние планеты известно. Имеются представления и о сложной дифференциации очагов загрязнения по большинству стран и регионов. Однако количественные показатели загрязнения, характеризующие динамику антропогенного воздействия во времени и пространстве, отсутствуют. В этой связи титаническая работа, выполненная В.Г. Прокачевой и В.Ф. Усачевым на протяжении последних 30 лет, уникальна как по содержанию и объёму, так и по целевому назначению. В настоящее время ей нет альтернативы.

Предложенный метод позволяет с погрешностью до 15% определить суммарные площади загрязнения Земли, оперативно обнаружить наиболее опасные очаги загрязнения в разных странах, регионах, бассейнах рек и субъектах дробного административного деления, а также находить (проектировать) трассы возможного переноса и стока токсичных веществ, места их вторичной аккумуляции или рассеивания. Конечно, для составления полной картины экологического состояния Земли этого недостаточно. Данные, полученные *ProcUs*-методом (так для краткости мы предлагаем назвать разработки В.Г. Прокачевой и В.Ф. Усачева), не отражают валовый и ингредиентный состав загрязняющих веществ. Метод фиксирует лишь площадь и форму ореола их осаждения. Однако, если получить зависимости спектральных и некоторых других физических характеристик выпавшего снега от количества и состава загрязнителей, а также от факторов их формирования, то откроются широчайшие возможности для решения проблем геоэкологии в масштабах всей планеты. Для этого необходимы долгосрочные комплексные работы на

специальных опытно-экспериментальных подспутниковых полигонах в разных частях света.

Могут быть возражения в части универсальности *ProcUs*-метода – ведь он позволяет определять далеко не все параметры загрязнения снежного покрова и, кроме того, не работает «напрямую» за пределами выпадения твёрдых атмосферных осадков (снега). Земли загрязняются не только через снежный покров, но и иными путями: водными потоками, животными организмами, микрофлорой и др. Да, это так. Однако снег, равно как и лёд разного происхождения (морской, речной, озёрный, наледный, ледниковый, подземный), характеризуются уникальными индикаторными свойствами. В них, кроме твёрдых частиц, имеющих отличное от вмещающей массы альбедо, откладываются также капельно-жидкие ингредиенты, не видимые на поверхности гляциальных образований. Вокруг городов и вдоль транспортных артерий происходит и газовое загрязнение снежно-ледяных толщ. Газовые пузырьки, защемлённые между кристаллами льда или «растворённые» в них, а также плёнки водных растворов на поверхности ледяных частиц могут многое рассказать о негативных процессах на Земном шаре. Они содержат важную информацию о составе загрязняющих веществ, времени их залпового или систематического выброса, направлениях миграции, процессах преобразования загрязнителей и многое другое. Это свойство криогенных систем многократно доказано гляциологами разных стран, особенно по данным глубокого бурения на горных ледниках, в Гренландии и Антарктиде.

Снег и лёд занимают гигантские площади на суше, на акваториях морей и океанов, при этом снежный покров в подавляющей области своего развития ежегодно перекрывает ледяные толщи. Он – самый обширный и самый динамичный объект,

аккумулирующий информацию о процессах во внешней среде (атмосфере). Эта информация со временем консервируется (переходит в состояние погребённого банка данных) в подстилающие снежники, льды и мёрзлые горные породы. Надо лишь найти способы извлечения этой информации и изучить возможности её интерполяции на тёплые и жаркие страны. И тогда мы получим материалы не только для исследований геоэкологических явлений настоящего, но и событий прошлого, а также для прогноза развития опасных ситуаций в будущем. Вот почему совокупность рассмотренных выше публикаций В.Г. Прокачевой и В.Ф. Усачева мы считаем фундаментальным вкладом в разработку современных проблем геоэкологии, особенно в части развития принципов и методов гляциоиндикации процессов загрязнения окружающей среды.

Сейчас трудно сказать, удастся ли почвам, водам и криогенным системам справиться с нарастающим антропогенным прессом. На этот вопрос можно ответить лишь в том случае, если начатые исследования продолжить в широком масштабе, в разных регионах и по единой методике. Для этого необходимо разработать и реализовать комплексную программу гляциоэкологических исследований в рамках международного аэрокосмического мониторинга экологического состояния нашей планеты. В этой программе должны найти достойное место принципы и подходы, уже разработанные российскими учёными В.Г. Прокачевой и В.Ф. Усачевым. Они предполагают, прежде всего, создание сети гляциоэкологических подспутниковых полигонов, опыт организации которых уже имеется. Частично он освещён в опубликованной монографии [6] и справочниках [11–15].

Заключение

Найден надёжный путь единовременной суммарной и серийной ретроспективной оценки нарастающего загрязнения земель по аэрокосмическим снимкам и данным опорных наземных наблюдений, позволяющий рассчитывать негативное воздействие человека на окружающую среду по регионам, речным бассейнам, государствам и планете в целом. Для получения необходимой информации использован гляциоиндикационный подход к изучению загрязнённых территорий вокруг городов и транспортных магистралей, названный *ProcUs*-методом. Предложенная методика проста и эффективна. С её помощью впервые в мировой науке и практике получены объективные количественные показатели техногенного загрязнения Земли. *ProcUs*-метод таит в себе большие возможности. Его следует расширить и углубить на основе специальных подспутниковых опытно-экспериментальных работ и использовать при реализации программы глобального экологиче-

ского мониторинга нашей планеты. Разработки российских учёных В.Г. Прокачевой и В.Ф. Усачева, выполненные в последние 30 лет, следует признать фундаментальным вкладом в гляциологию и геоэкологию. Накопленные авторами материалы по загрязнённости регионов, стран и континентов следовало бы обобщить и издать в виде отдельной монографии.

Литература

1. Временные методические рекомендации по использованию спутниковой информации: Оценка загрязнения снежного покрова вблизи промышленных центров / Под ред. В.Ф. Усачева. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 47 с.
2. Зоны загрязнения снежного покрова вокруг городов на территории СССР: Каталог для городов с населением более 50 тыс. человек / В.Г. Прокачева, Н.П. Чмутова, В.П. Абакуменко, В.Ф. Усачев. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 125 с.
3. Зоны хронического загрязнения вокруг городских поселений и вдоль дорог по республикам, краям и областям Российской Федерации / В.Г. Прокачева, В.Ф. Усачев, Н.П. Чмутова. СПб.: изд. ГГИ, 1992. 188 с.
4. Показатели техногенной запыленности земель в океанических странах Северной Европы (Норвегия, Дания, Исландия, Ирландия, Великобритания) и на Североамериканском континенте / В.Г. Прокачева, В.Ф. Усачев. СПб., 2001. 36 с. Деп. в ВИНТИ 03.04.01. № 868. В-2001.
5. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Об особенностях снеготаяния вблизи промышленных центров и возможности наблюдения этого процесса дистанционными средствами // Тр. ГГИ. 1984. Вып. 299. С. 28–36.
6. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров в сфере влияния города. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 176 с.
7. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. От космических снимков к эколого-гидрографической статистике // ИНТЕРКАРТО-5. ГИС для устойчивого развития территории. Ч. 3: ГИС и картография в экологии и охране природы. Якутск: изд. ЯГУ, 1999. С. 104–116.
8. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Оценка загрязняемых площадей на водосборе Черного и Азовского морей. СПб., 1999. 44 с. Деп. в ВИНТИ 15.12.99. № 3705. В 99.
9. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Хронически загрязняемые территории на водосборах российских рек // Водное хозяйство России. 2001. Т. 3. № 1. С. 66–73.
10. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Техногенно-загрязняемые земли по государствам и континентам (статистическая оценка). СПб., 2002. 39 с.
11. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Загрязнение земли в регионах России. Гидрографический аспект. СПб.: Недра, 2004. 106 с.
12. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Загрязнение земли по районам, городским поселениям и в речных водосборах. Северо-Западный Федеральный округ России. СПб.: Недра, 2006. 107 с.
13. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Загрязнение земли по районам, городским поселениям и в речных водосборах. Уральский Федеральный округ России. СПб.: Недра, 2007. 110 с.
14. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Загрязнение земли по районам, городским поселениям и в речных водосборах.

- Сибирский Федеральный округ России. СПб.: Изд-во «Лема» Недра, 2010. 162 с.
15. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Загрязнение земли по районам, городским поселениям и в речных водосборах. Дальневосточный Федеральный округ России. СПб.: Изд-во «Лема» Недра, 2011. 110 с.
 16. Пространственные характеристики техногенного загрязнения территории по воеводствам Польши, по областям Словакии и Чехии, по землям Германии / В.Г. Прокачева, В.Ф. Усачев. СПб., 1997. 54 с. Деп. в ВИНТИ 03.12.97. № 3538. В97.
 17. Пространственные характеристики техногенного загрязнения территории по губерниям Швеции, Дании и Норвегии / В.Г. Прокачева, В.Ф. Усачев. СПб., 1997. 50 с. Деп. в ВИНТИ 08.08.97. № 2636. В97.
 18. Размещение техногенно загрязняемых площадей на водосборе Каспийского моря / В.Г. Прокачева, В.Ф. Усачев. СПб., 1998. 21 с. Деп. в ВИНТИ 16.12.98. № 3722. В98.
 19. Спектральная отражательная способность снежного покрова. Каталог спектральных коэффициентов яркости снежного покрова в естественном состоянии и при искусственном запылении его поверхности. Spektrales Reflexionsvermögen der Schneedecke. Katalog der spektralen Koeffizienten der Helligkeit der Schneedecke im natürlichen Zustand und bei künstlicher Einstaubung ihrer Oberfläche / В.Ф. Усачев, Д. Олоншек, В.Г. Прокачева, Т. Гюнтер. Л.: изд. ГГИ (ФОЛ ВНИГЛ), 1988. 92 с.

Summary

A reliable technique has been devised for a simultaneous total and serial retrospective assessment of the ever increasing pollution of lands from aerospace images and from benchmark ground-based observations which

permit calculations of the negative human impact on the environment for the particular regions, river drainage basins, states, and for the planet Earth as a whole. Use is made of the glacio-indication approach to the study of polluted territories around cities and transport routes that has come to be known as the «*ProcUs* method». An assessment of the land pollution across the globe was made for 221 administrative entities. Calculations were done for 193 states and 41 trust territories. The total area of polluted lands on the continents was estimated at 13 606 thousand km² (10% of the Earth's land surface). The heaviest pollution corresponds to West Europe (44.5% of its area), Micronesia (33.3%), and to the countries within the Caribbean basin (31.1%); the worst levels of land pollution correspond to Australia with New Zealand (2.1%), Melanesia (3.1%), and to Central Africa (3.8%). The most heavily polluted states are China (with the polluted area of 2400 thou km²), India (1460 thou km²), the USA (1156 thou km²), Russia (683 thou km²) and Brazil (657 thou km²).

The findings, obtained by the Russian scientists V.G. Prokacheva and V.F. Usachev over the course of the last 30 years, are recognized as a fundamental contribution to glaciology and geoecology. The *ProcUs* method, suggested by Russian scientists, offers strong possibilities of obtaining quantitative indicators and studying spatiotemporal variability of pollutants. It is recommended that the method should be expanded and sophisticated on the basis of special-purpose ground-truth pilot observations to be used in implementing the Earth's global ecological monitoring program.