Данные космических наблюдений параметров поверхности в модели рассеяния индустриальных загрязнений воздуха AERMOD. Часть 1. Обзор, данные, классификация землепользования

Б. М. Балтер [1], Д. Б. Балтер [1], В. В. Егоров [1], М. В. Стальная [1], М. В. Фаминская [2]

[1] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: victor_egorov@mail.ru

[2] *Российский государственный социальный университет, Москва, 129226, Россия*
E-mail: faminskaya@mail.ru

Модель дисперсии индустриального загрязнения воздуха AERMOD уточняется с помощью наблюдений дистанционного зондирования. Оценивается эффект от привлечения специфичных для каждой территории данных по альбедо, шероховатости поверхности и коэффициенту Боуэна вместо глобальных стандартов AERMOD, а для необходимой для оценки этих параметров классификации землепользования — эффект от привлечения космических данных вместо имеющихся в свободном доступе глобальных карт. В настоящей части работы даётся обзор исследований по извлечению указанных параметров из космических данных, использованию их в AERMOD и влиянию на модельные концентрации. Далее описаны исходные данные для исследования этого вопроса в настоящей работе на материале пяти реальных предприятий и способы измерения эффекта привлечения космических данных. Эффект измеряется тремя способами: а) как разность между годовыми максимумами часовых концентраций критичного загрязнителя («абсолютный максимум»); б) то же с ограничением дневными рабочими часами и использованием 95%-го квантиля вместо абсолютного максимума («регуляторный критерий»); в) как максимальная почасовая разница за год («мгновенный критерий»). Значения этих критериев делятся либо на референтную концентрацию загрязнителя, что даёт меру влияния на острый риск, либо на концентрацию по стандартам AERMOD, что даёт относительную меру влияния космических данных. В настоящей части исследован эффект привлечения классификации землепользования, выполненной по космическим данным.

Ключевые слова: AERMOD, модель рассеивания загрязнителей, альбедо, шероховатость, параметр Боуэна, классификация землепользования, максимальные разовые концентрации, Landsat, ALOS, GLASS, ERA5

Одобрена к печати: 09.12.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-97-111

Введение

Программный комплекс AERMOD (American Meteorological Society-Environmental Protection Agency Regulatory Model) — один из наиболее широко используемых инструментов моделирования рассеивания в воздухе загрязняющих веществ от промышленных источников. На этой основе оценивается риск для здоровья. Комплекс содержит микрометеорологическую модель, основанную: а) на наблюдениях с местных метеорологических станций; б) альбедо, параметре Боуэна (Bo) и шероховатости поверхности, рассчитанных для каждой категории землепользования на основе глобальных стандартов; в) данных о вертикальном профиле атмосферы, полученных с ближайшего радиозонда. Со времени введения AERMOD благодаря космическим наблюдениям поверхности и атмосферы стали доступны многие новые потенциально полезные и бесплатные данные. В статье рассматривается потенциальное применение этих новых источников данных для моделирования рассеяния загрязнения с помощью AERMOD. Наше исследование ограничено тем, что не происходит вмешательства в микрометеорологическую модель AERMET (AERMOD Meteorological Preporcessor), встроенную в AERMOD, и вводятся новые данные только по стандартным каналам, предоставляемым AERMOD.

В работе даётся обзор исследований по извлечению указанных параметров из космических данных, использованию их в AERMOD и влиянию на модельные концентрации. Описаны исходные данные для исследования этого вопроса в настоящей работе на материале реальных предприятий со множеством источников выброса в отличие от приведённых в обзоре работ, где в основном исследуется изолированный источник. Рассматриваются пять различных промышленных предприятий с особым акцентом на три объекта: коксохимический завод под Москвой, очистную станцию на юге России, металлургический завод в Приуралье (Балтер и др., 2017). Описаны три способа измерения эффекта привлечения космических данных: а) DiffLast — разность между годовыми максимумами часовых концентраций критичного загрязнителя («абсолютный максимум»); б) Day95% — то же с ограничением дневными рабочими часами и использованием 95%-го квантиля вместо абсолютного максимума («регуляторный критерий»); в) DiffFirst — максимальная почасовая разница за год («мгновенный критерий»), от которых, в свою очередь, зависит рассеяние загрязнений и результирующие приземные концентрации, определяющие воздействие на здоровье населения.

Целями представленной части работы являются: аналитический обзор современных литературных источников для выявления типов космических данных, наиболее перспективных для использования в AERMOD; оценка того, в какой степени использование космических данных изменяет моделируемые концентрации загрязняющих веществ, наиболее важные для здоровья человека; изучение по космическим данным влияния классификации землепользования на концентрацию загрязняющих веществ.

Космические данные, реанализ и климатические модели: обзор влияния на модельные концентрации

Использование космических данных встроено в AERMOD с самого начала, поскольку его процессор параметров поверхности AERSURFACE (AERSURFACE..., 2008) опирается на готовую классификацию NLCD-92 (Enhanced National Land Cover Data 1992) территории США на основе данных искусственного спутника Земли (ИСЗ) Landsat по 21 категории землепользования. Каждой категории присваиваются зависящие от сезона параметры поверхности, называемые ниже стандартами AERSURFACE. Классификации землепользования доступны не везде за пределами США, по крайней мере не такие подробные, как NLCD-92, и в любом случае глобальная применимость стандартных параметров AERSURFACE вызывает сомнения. В этих случаях можно пытаться расширить или дополнить подход Landsat + AERSURFACE использованием других типов данных: 1) создать совместимую с NLCD-92 классификацию землепользования и затем использовать стандарты AERSURFACE; 2) непосредственно оценить параметры поверхности, требуемые для AERMOD (альбедо, параметр Боуэна и шероховатость); 3) интегрировать параметры атмосферы, предоставляемые существующими глобальными климатическими моделями, в рабочий процесс AERMOD. Ниже даётся краткий обзор этих трёх направлений исследований.

По первому направлению самый простой подход заключается в использовании существующей классификации землепользования. Авторы работы (Bo et al., 2015) переносят подход США на ситуацию в Китае, используя существующую геоинформационную систему (ГИС) землепользования для создания классификации NLCD-92 через переназначение категорий ГИС. Тот же метод был применён в Таиланде (Pongprueksa, Chatchupong, 2016). В качестве альтернативы можно использовать глобальную классификацию землепользования GLC30 (Global Land Cover) с разрешением 30 м (Arsanjani, 2018; Arsanjani et al., 2016) или GLC10 с разрешением 10 м. Однако оба варианта используют более грубую систему категорий, чем NLCD-92, особенно для застроенных территорий, так что существует проблема перевода между двумя системами. Другая глобальная классификация землепользования на основе данных MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) MCD12Q1 (MODIS Land Cover Type) (Garcia-Mora et al., 2012) имеет более низкое разрешение (500 м), но для AERMOD этого может быть достаточно. Использование GLC30, GLC10 и MCD12Q1 с AERMOD рассма-

тривалось в работе (Balter et al., 2017). Показано, что, как и ожидалось, классификация данных Landsat на основе локальных обучающих участков даёт более правдоподобные результаты, чем любая глобальная классификация. Такая классификация землепользования является одним из самых ранних и наиболее развитых приложений данных дистанционного зондирования, но имеется мало случаев его использования с AERMOD. Такая попытка сделана в настоящей работе для пяти предприятий, каждое из которых представляет определённый тип индустрии.

По второму направлению широкополосное альбедо можно надёжно оценить по данным многих космических оптических сенсоров. Этот подход широко применяется в климатических исследованиях (см. обзор в работе (He et al., 2018)). Наиболее часто используются Landsat и MODIS, когда требуется разрешение от десятков до сотен метров. Авторы исследования (Pape, Vohland, 2010) сравнивают эти данные и приводят формулы широкополосного альбедо для обоих сенсоров в ламбертовском приближении. Продукты MODIS MCD43A1-A4 дают двунаправленное распределение коэффициента обратного рассеяния (*англ*. BRDF — Bidirectional Reflectance Distribution Function), необходимое для учёта неламбертовских эффектов, включая разделение воздействия рассеянного и прямого света на альбедо, как описано, например, в работе (Qu et al., 2014). В исследовании (Liu et al., 2009) показано, что этот подход даёт точность альбедо ~0,05 (с отрицательным смещением). В публикации (Baldinelli et al., 2017) исследуется городской тепловой остров (учёт которого производится в AERMOD) и показывается, что формулы широкополосного альбедо нуждаются в коррекции в данном контексте. Насколько нам известно, ни один из этих подходов не использовался с AERMOD. В настоящей статье не используются все эти уточнения, а только ламбертовское приближение.

Ко второму направлению относится также оценка шероховатости поверхности (*англ*. roughness). Она использует разные подходы для малых (< ~1 м) и больших (> ~1 м) значений шероховатости. Первый тип характерен для лугов, сельскохозяйственных культур и т. д., а второй — для лесов и зданий. Малая шероховатость либо непосредственно наблюдается по обратному рассеянию радара (см., например, работу (Srivastava et al., 2008)), либо оценивается по моделям, основанным на оптическом наблюдении параметров растительности, таких как NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) или LAI (Leaf Area Index — индекс листовой поверхности). Например, в хорошо известном алгоритме SEBAL шероховатость рассчитывается как $Z_0 = \exp(C_1 + C_2 \cdot \mathrm{NDVI})$, где C_1 и C_2 — постоянные, специфичные для конкретной рассматриваемой территории. В работе (Gupta et al., 2002) рекомендуемые значения составляют $C_1 = -5{,}5$, $C_2 = 5{,}8$. В публикации (Gowda et al., 2008) для растительности выше 1 м принимается $Z_0 = 0{,}005 + 0{,}02\mathrm{LAI}$ (м), а для растительности высотой менее 1 м — $Z_0 = \max\,(0{,}005,\ 0{,}018\mathrm{LAI})$ (м). В исследовании (Cho et al., 2012) шероховатость растительности связана с альбедо α как $\log Z_0 = -16{,}8\alpha + 1{,}87$. Большую шероховатость можно наблюдать для населённых пунктов с помощью радара (см., например, работу (Zhang et al., 2017)) или оптической стереоскопии, как для ALOS (Advanced Land Observing Satellite) (Tadono et al., 2016). Для леса шероховатость может оцениваться по моделям на основе LAI. В настоящей статье используются NDVI и ALOS с добавлением двух новых подходов. Один основан на скачке наблюдаемой высоты на границе леса, другой — на вариациях высоты в населённых пунктах, откалиброванной по данным OSM (Open Street Map) на репрезентативных участках. Радарные данные, хотя потенциально наиболее чувствительны к малой шероховатости, всё ещё находятся на экспериментальной стадии из-за зависимости от многих других факторов, в первую очередь от влаги, как описано в публикации (Verhoest, Lievens, 2014), и не используются в настоящей статье. В городских условиях перспективным направлением является сочетание цифровых моделей рельефа (*англ*. DEM — Digital Elevation Model), построенных по данным дистанционного зондирования, и данных ГИС по зданиям. Недавно для этой цели был разработан специализированный процессор UMEP (Lindberg et al., 2018).

По второму направлению невозможна прямая оценка параметра Боуэна по космическим наблюдениям: его определение возможно лишь в рамках третьего направления.

Таблица 1. Чувствительность модельных 1-часовых, 3-часовых, 24-часовых и годовых концентраций Δ(Conc) к изменениям альбедо Δ(α), параметра Боуэна Δ(Bo) и шероховатости Δ(Z_0)

Исследование	Тип источника	Δ(α)	Δ(Conc), %			Δ(Bo)	Δ(Conc), %			Δ(Z_0), м	Δ(Conc), %		
			1-ч, 3-ч	24-ч	1-год		1-ч, 3-ч	24-ч	1-год		1-ч, 3-ч	24-ч	1-год
Grosch, Lee, 1999	Низкий площадной	0,1–0,45	0	1	3	0,1–10	0	0	3	0,001–10	12 500	10 600	7200
	Высота 35 м точечный		7...14	5	19		21...28	5	35		24...49	81	85
Long et al., 2004	Низкий точечный	×0,25–4	–2	3		×0,5–2			–0,5...0,4	×0,25–4	52	–21	
	Низкий объёмный		1	6				0,7...–0,5					85...–67
	Высота 49 м точечный				6...–33				–8...6				–18...104
Karvounis et al., 2007	7 труб высотой 12–60 м	0,2×0,5–2	0*			0,1–1	20...–13*			0,2×0,5–2	30...–25*		
Faulkner et al., 2008	Низкая площадь	0,1–0,9	0	–0,6...25				0		0,001–3,7		192...–86	
Pascal et al., 2011	Высота 20 м точечный	0,15–0,45	<2	<2		0,5–2	<2			0,3–1	25		

* — без исключительных метеорологических условий;
× — коэффициент умножения на стандартное значение AERSURFACE.

По третьему направлению оценка параметра Боуэна использует климатические и/или мезомасштабные метеорологические модели, которые, в свою очередь, ассимилируют данные дистанционного зондирования. Существует два основных метода расчёта параметра Боуэна: а) по соотношению градиентов потенциальной температуры и удельной влажности в вертикальных профилях параметров атмосферы; б) по отношению наблюдаемого теплового потока на поверхности к скрытому тепловому потоку, причём оба рассчитываются по балансу входящего и исходящего коротковолнового и длинноволнового излучения. Оба метода сравниваются, например, в работе (Malek, 1993). В обоих случаях используются результаты реанализа или климатические модели, и нам неизвестны публикации по прямому определению параметра Боуэна на основе данных дистанционного зондирования. Основанные на модели оценки параметров Боуэна имеют пространственное и временное разрешение, адаптированное к климатическим исследованиям. Пространственное разрешение значительно грубее, чем получаемое для альбедо и шероховатости. В контексте AERMOD проблема пространственного разрешения смягчается тем, что параметр Боуэна является средним геометрическим на площади 10×10 км и зависит только от сезона.

С введением в AERMOD зависимости от вышеупомянутых параметров поверхности несколько исследований оценивали чувствительность модельных концентраций к ним. Результаты показаны в *табл. 1.* В одном из первых исследований (Grosch, Lee, 1999) был сделан вывод, что для *поверхностного* источника только шероховатость поверхности существенно влияет на расчётные концентрации; альбедо и параметр Боуэна практически не влияют на среднегодовые расчётные концентрации. Также не было никакого влияния альбедо или параметра Боуэна на максимальные 1-часовые или 3-часовые концентрации, потому что они образуются в стабильных условиях, в основном ночью, когда эти параметры не входят в алгоритм AERMET. Для *приподнятого* источника влияние альбедо и параметра Боуэна было значительным, поскольку в данном случае максимальные концентрации наблюдаются около полудня. Это важно для интерпретации результатов нашей статьи, где приходится иметь дело не с изолированным источником, а с реальными предприятиями, включающими совокупность поверхностных и высоких источников. В настоящее время консенсус исследователей состоит в том, что «AERMOD очень чувствителен к изменениям в длине шероховатости поверхности и довольно безразличен к изменениям отношения альбедо и Боуэна» (Karvounis et al., 2007). В работе (Pascal et al., 2011) относительное влияние параметров AERSURFACE в значительной степени зависит от розы ветров и расстояния от источника.

Растёт интерес к использованию для моделирования качества воздуха существующих мезомасштабных метеорологических моделей: MM5 (Mesoscale Model) (Isakov et al., 2007), WRF (Weather Research and Forecasting) (Kesarkar et al., 2007; Kumar et al., 2015, 2017) и др. Из-за грубого пространственного разрешения таких моделей они в основном используются вместе с моделями качества воздуха с более грубым разрешением, чем у AERMOD, например CMAQ (Congestion Mitigation and Air Quality) (Kumar et al., 2017). При использовании с AERMOD эти модели обычно рассматриваются как замена локальных метеорологических данных (Kumar et al., 2015) или как модели, заменяющие AERMET (Kesarkar et al., 2007), поскольку они предоставляют полный спектр параметров, связанных с дисперсией и необходимых для AERMOD. В продолжении данной статьи такие модели рассматриваются как улучшение местной метеорологии и источник данных для модели AERMET, а не как её замена. На полпути между климатическими/метеорологическими моделями и наблюдениями с помощью дистанционного зондирования находятся базы данных реанализа: GLASS (Global Land Atmosphere System Study), ERA5, NCAR/NCEP (NCAR — National Center for Atmospheric Research, Национальный центр исследований атмосферы США; NCEP — National Centers for Environmental Prediction, Национальный центр экологических прогнозов США) и др., перечисленные в следующем разделе.

Данные, используемые в статье

Чтобы изучить влияние космической классификации землепользования на концентрацию загрязняющих веществ, были выбраны пять предприятий из более чем 100, для которых нами проведён расчёт рассеяния загрязнений. Предприятия выбирались как представители различных отраслей промышленности (*табл. 2*). При оценке рисков для здоровья населения использовался принятый в 2004 г. документ (Руководство..., 2004). Мерилом оценки неканцерогенной опасности того или иного вещества служит сравнение с международно признанной референтной концентрацией. Максимальные разовые концентрации сравниваются с референтными концентрациями для острого воздействия RFC_{ac}, а среднегодовые концентрации — с референтными концентрациями для хронического воздействия RFC_{ch}.

Таблица 2. Изучение предприятий на предмет воздействия классификации и их максимальных часовых (C_{max}) и среднегодовых (C_{avg}) концентраций критических загрязнителей в критических точках за пределами зон отчуждения. Приведены концентрации в мг/м^3 (курсивом) и их отношения к соответствующим допустимым нормативам — референтным концентрациям RFC_{ac}, RFC_{ch} (острой и хронической)

	Предприятие (№)				
	1	2	3	4	5
Тип	Химия кокса	Станция очистки	Металлургия	Хранилище нефти	Целлюлозно-бумажный комбинат
Координаты	56° с. ш., 38° в. д.	44° с. ш., 44° в. д.	55° с. ш., 59° в. д.	45° с. ш., 38° в. д.	59° с. ш., 38° в. д.
Окружение	Подмосковье	Равнинный малый город	Карьеры	Морской порт и горы	Озеро и лес
Основной загрязнитель	Коксовая пыль	NO_2	Железомарганцевая пыль	Углеводороды C_1–C_5	Древесная пыль
C_{max}/RFC_{ac}	1,2 = *0,35*/0,3	2 = *0,4*/0,2	2,8 = *1,4*/0,5	3,2 = *29*/9	1,3 = *0,63*/0,5
C_{avg}/RFC_{ch}	0,4 = *0,03*/0,075	0,75 = *0,03*/0,04	0,27 = *0,02*/0,075	0,2 = *0,04*/0,2	0,07 = *0,005*/0,075

Что касается влияния параметров поверхности, то здесь внимание было сосредоточено на первых двух-трёх предприятиях. Для всех предприятий был включён полный набор источников загрязнения, как указано в их нормативных документах. Для упрощения интерпретации результатов предполагалось, что все источники работают непрерывно с постоянной интенсивностью выбросов в отличие от обычно применяемого нами подхода к моделированию рассеяния, где учитывается переменность выбросов (Balter, Faminskaya, 2017). Моделирование было выполнено за 2013–2018 гг. Для изучения воздействия классификации сравнивались два режима: классификация землепользования на основе Landsat по местным обучающим участкам и доступные в интернете глобальные карты землепользования, которые переводились в систему NLCD-92. Сравнивались два режима моделирования: «стандартный», основанный на классификации землепользования на базе Landsat плюс метеорологические данные с ближайшей станции, и «экспериментальный», который заменял один из трёх параметров поверхности полученными значениями из данных дистанционного зондирования и/или из баз данных реанализа.

В *табл. 3* перечислены источники данных, которые тестировались в настоящей работе. Не все попытки были успешными, например, пришлось отказаться от NCEP/NCAR в пользу ERA5 из-за лучшего пространственного разрешения и от данных MODIS, потому что они были повторно проанализированы и ассимилированы в GLASS. Двумя источниками данных, наиболее часто используемыми в работе, были Landsat и GLASS (Jiang et al., 2018; Liang et al., 2014). К сожалению, не все наборы данных GLASS охватывают весь промежуток времени 2013–2018 гг. С учётом будущего применения данных в производственном/нормативном контексте был сделан упор на данные, которые являются бесплатными и не требуют больших усилий пользователя для получения параметров, необходимых для AERMOD.

Таблица 3. Источники данных и их применение (отмечено «+») для классификации землепользования (C), альбедо (α), параметра Боуэна (Во) и шероховатости (Z_0)

Источник	Набор данных	Тип данных	Разрешение	Частота	Источник	C	α	Во	Z_0
Космические данные									
Landsat	LC8	Поверхность: NDVI, яркость, LAI	30 м	5–10/год	ESPA — EROS (Earth Resources Observation and Science) Center Science Processing Architecture on Demand Interface (https://espa.cr.usgs.gov/)	+	+	+	+
MODIS	MCD12Q1, MOD16A2	Поверхность: категории землепользования, ET	500 м	8 дней	USGS (United States Geological Survey) LPDAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) (https://lpdaac.usgs.gov/)	+		+	
	MOD07L2	Атмосферный профиль	5 км	3–5 раз/день	MODAPS (MODIS Adaptive Processing System) services (https://modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/)			+	
Реанализ									
GLASS	Albedo, LAI, ET, LWNR, NR	Поверхность: тепловые потоки, параметры	1 км – 0,05°	1–8 дней	BNU (Beijing Normal University) Data Center (http://glass-product.bnu.edu.cn/)		+	+	
NCEP/NCAR	gflux, lhtfl, shtfl, nlwrs, nswrs	Поверхность: тепловые потоки	2,5°	4 раз/день	NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ESRL (Earth System Research Laboratories) (https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html)			+	
ERA5	ishf, slhf, sshf, ssr, str, fsr	Поверхность: тепловые потоки	0,125–0,25°	8 раз/день	Copernicus CDS (Climate Data Store) (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels)			+	
	t, q	Атмосферный профиль		4 раз/день	Copernicus CDS (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels)			+	
Рельеф, землепользование									
ALOS DSM	AW3D30	Рельеф	30 м	2006–2011	JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) EORC (Earth Observation Research Center) (https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm)				+
ASTER GDEM	ASTER GDEM V3	Рельеф	30 м	2000–2013	JSS (http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/)				+
GLC	GLC10, GLC30	Категории землепользования	10 м, 30 м	2000, 2010	http://www.globallandcover.com/GLC30Download/index.aspx; http://data.ess.tsinghua.edu.cn/fromglc10_2017v01.html	+			

Примечание: ASTER — *англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer; GDEM — *англ.* Global Digital Elevation Model, глобальная цифровая модель рельефа; LWNR — *англ.* Surface longwave net radiation; DSM — digital surface model; JSS — Japan Space Systems.

Сначала выбирались наборы данных, которые дают разумные значения входных параметров AERMOD, и разрабатывались процедуры для сопряжения этих наборов данных с AERMOD. Затем изучалось влияние на модельные концентрации загрязняющих веществ использование космических параметров в качестве замены стандартов AERSURFACE. Был сделан акцент на максимальных часовых концентрациях, поскольку воздействие для них самое большое. Воздействие, хотя в целом следует тем же тенденциям, что и чувствительность, описанная выше, всё же отличается, поскольку приходится иметь дело с реальными предприятиями с множеством источников, а не с отдельными источниками, как в большинстве исследований чувствительности. Влияние использования космических данных и реанализа оценивалось тремя способами. Во-первых, сравнивались абсолютные годовые максимумы концентраций в каждом регионе, на который делится территория. Это основной нормативный показатель, но он меньше всего подвержен влиянию космических данных и реанализа, поскольку максимумы обычно формируются в стабильной атмосфере, преимущественно в ночное время, когда параметры альбедо и Боуэна не входят в алгоритм AERMOD. Эта мера названа нами DiffLast. Во-вторых, рассматривались ситуации, когда нет такого преобладания стабильных условий: выбросы ограничены дневными рабочими часами 08:00–17:00 и измеряются 95%-м квантилем, а не абсолютным максимумом концентраций. Эта мера названа Day95%. В третьем варианте в качестве показателя берётся максимальная почасовая разность концентраций за год, усреднённая по каждому району, на которые разбита территория вокруг предприятия. Данная мера названа DiffFirst. Этот показатель более чувствителен к космическим данным и данным реанализа благодаря использованию максимальной разности вместо разности максимумов. Однако его практическое значение является дискуссионным: это «наихудший случай» с точки зрения моделирования рассеяния загрязнений, но не с точки зрения влияния на здоровье населения.

Влияние классификации землепользования на модельные концентрации

Сравниваются концентрации, полученные путём применения стандартов AERSURFACE к готовым глобальным классификациям землепользования GLC30, GLC10 и MOD12Q1, с концентрациями, полученными путём применения классификации с обучением к многолетним данным ИСЗ Landsat на локально выбранных тестовых участках. В большинстве случаев классификация проводилась методом взвешенного максимального правдоподобия (ML — *англ.* maximum likelihood). Процедура описана в работе (Балтер и др., 2017). Она включает в себя кластеризацию полного многолетнего набора данных Landsat, очищенного от облаков, выбор тестовых участков, соответствующих категориям NLCD-92, внутри наиболее представительных кластеров, классификацию ML и ручную настройку весов категорий, чтобы исключить очевидные ошибочные классификации. Разработано специальное программное обеспечение для этих операций, которые используются как часть производственного процесса в проектах по оценке адекватности СЗЗ (санитарно-защитных зон) с учётом рисков для здоровья населения. Для тонкой проблемы различения промышленных территорий, жилых районов с высокой плотностью и жилых районов с низкой плотностью используется инструмент двойной корреляции, описанный в работе (Балтер и др., 2019). Отображение категорий GLC30, GLC10 и MOD12Q1 в категории NLCD-92 описано в публикации (Балтер и др., 2017). На *рис. 1* (см. с. 105) показаны результаты для предприятий 1 и 2.

По приведённым картам категорий землепользования вычислялись параметры поверхности на базе стандартов AERSURFACE. На их основе проводился расчёт рассеяния. Максимальные почасовые концентрации, полученные на основе глобальных карт (в качестве примера взята GLC10), сравниваются с концентрациями, полученными на основе ML-классификации данных Landsat, и их разницу (по абсолютному значению) показывает *рис. 2* (см. с. 105). Здесь и далее используется схема цветового кодирования «радуга» и указывается уровень, превышение которого показано красным цветом. 10 % этого уровня отображается фиолетовым цветом, а значения ниже 10 % не окрашены.

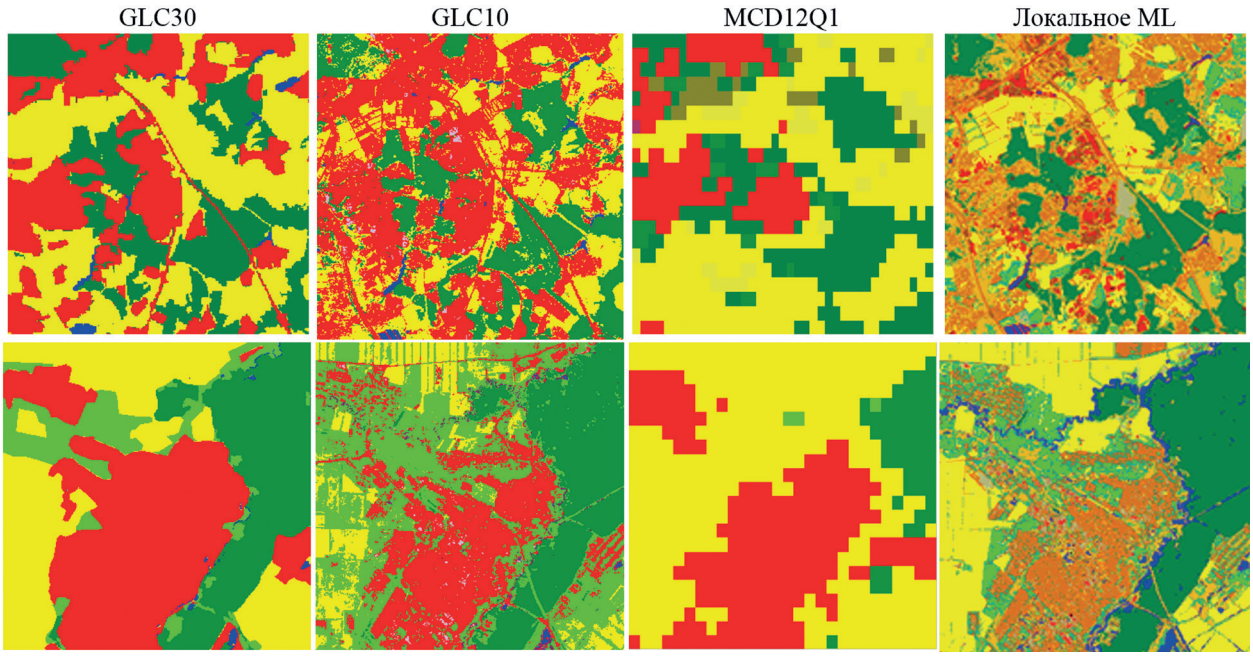
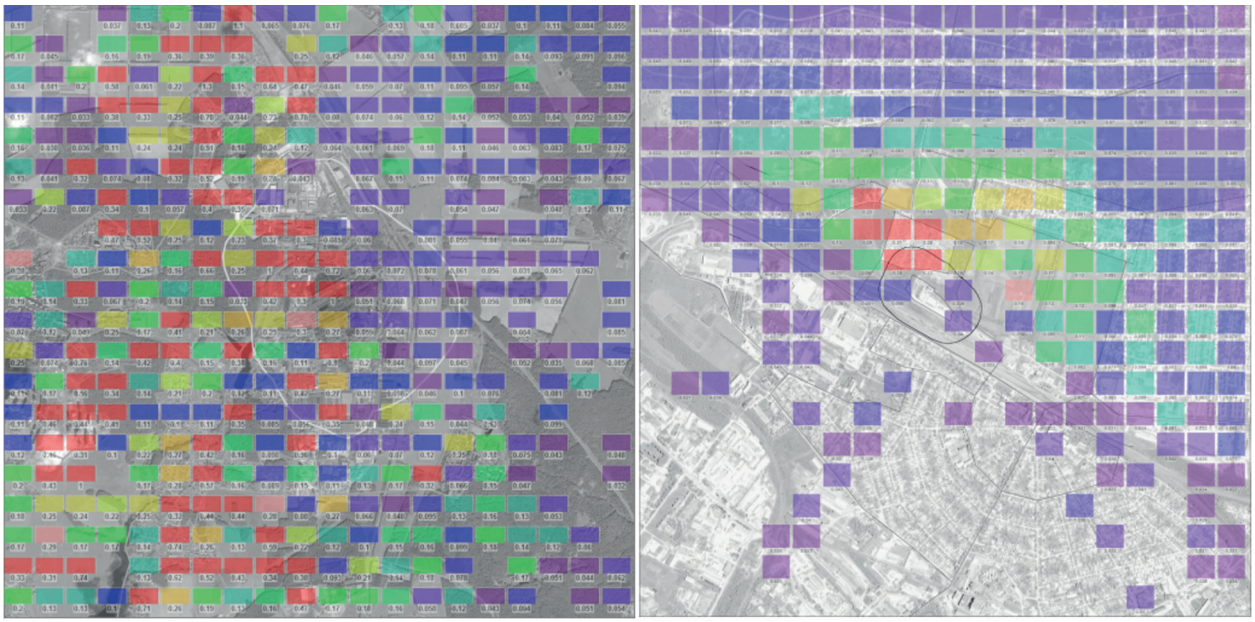


Рис. 1. Сравнение готовых глобальных классификаций землепользования и классификации с обучением по локальным тестовым участкам. Красный цвет — индустрия для локальных данных и любая застройка для глобальных данных; тёмно-зелёный — смешанный лес; жёлтый — зерновые культуры; синий — вода; светло-коричневый — жилой район низкой плотности для локальных данных; тёмно-коричневый — жилой район высокой плотности для локальных данных; зелёный — луга; серый — голая почва. Верхний ряд — предприятие 1, нижний ряд — предприятие 2



Предприятие 1 Предприятие 2

Рис. 2. Абсолютная разница между годовыми максимумами критических загрязнителей (DiffLast), рассчитанными по GLC10 и по классификации на основе Landsat. Красный цвет — превышение RFC_{ac}, различия менее $0{,}1RFC_{ac}$ не показаны

Рисунок 2 демонстрирует, что эффект от использования космических данных для классификации землепользования важен — сопоставим с референтной концентрацией RFC_{ac}, являющейся порогом допустимости. Это очевидно даже при использовании метода измерения эффекта DiffLast, который наименее чувствительный.

Таблица 4. Разница максимальных почасовых концентраций, полученных с помощью глобальных (GLC10) и локальных (LC8) карт землепользования, по отношению к RFC_{ac} или к GLC10 для критического загрязнителя

Предприятие	RFC_{ac}, мг/м^3	|GLC10 – LC8|/RFC_{ac} DiffFirst	|GLC10 – LC8|/GLC10 DiffFirst	|GLC10 – LC8|/RFC_{ac} DiffLast	|GLC10 – LC8|/GLC10 DiffLast	|GLC10 – LC8|/RFC_{ac} Day95%	|GLC10 – LC8|/GLC10 Day95%
Среднее значение по расчётной территории							
1	0,3	0,60	0,32	0,36	0,19	0,013	0,38
2	0,2	0,52	0,42	0,31	0,27	0,024	0,39
3	0,3	0,40	0,93	0,19	0,41	0,009	0,28
4	9	2,43	0,31	1,04	0,14	0,046	0,26
5	0,5	1,06	0,68	1,20	0,58	0,01	0,77
В критическом жилом районе							
1	0,3	1,31	0,34	0,86	0,22	0,021	0,36
2	0,2	2,57	0,37	1,63	0,23	0,24	0,19
3	0,3	0,46	0,98	0,18	0,39	0,004	0,16
4	9	1,34	0,17	0,63	0,08	0,001	0,02
5	0,5	1,34	0,58	1,40	0,56	0,0017	0,20

Основная причина значительного эффекта — влияние классификации землепользования на оценку шероховатости поверхности, которая входит в формулы AERMOD для стабильных условий и ночного времени, когда в основном и формируются максимальные концентрации.

Такие расчёты были выполнены для пяти предприятий, перечисленных выше, с некоторыми упрощениями по сравнению с полным моделированием рассеяния: не учитывался рельеф и импульсный характер ряда выбросов. *Таблица 4* показывает результаты расчётов. Сравниваются концентрации, полученные на основе классификации ML-данных Landsat (LC8), со значением концентраций, полученных на готовой глобальной карте GLC10. Использовались три описанных выше критерия для оценки эффекта привлечения космических данных. Этот эффект измеряется либо относительно RFC_{ac} (т. е. в единицах индекса острого риска для здоровья), либо относительно значений, полученных с GLC10, т. е. в «относительных» единицах. Поскольку критерий Day95% подразумевает значительное урезание максимальных концентраций, его целесообразно сравнивать с другими критериями по относительному значению, а не по индексу острого риска. Эффект использования многолетних данных Landsat для классификации является значительным: в относительных единицах — десятки процентов (до 100 %), а по индексу риска в некоторых случаях превышает 1, т. е. допустимый предел.

Таким образом, уточнение классификации землепользования вокруг предприятия по космическим данным существенно влияет на модельные максимальные разовые концентрации загрязнителей, а через них — на острый риск для здоровья населения. Это связано с уточнением всех трёх параметров поверхности: альбедо, параметра Боуэна и шероховатости, из которых наиболее существенным является последний.

Заключение

Описана проблема применимости стандартной для AERMOD классификации категорий поверхности NLCD-92 вне территории США и рассмотрены три подхода для её решения: 1) создание совместимой с NLCD-92 классификации; 2) непосредственная оценка требуемых параметров; 3) использование параметров атмосферы глобальных климатических моделей в рабочем процессе AERMOD. Результаты обзора литературы по системам классификации землепользования указывают, что наиболее перспективной является классификация на основе локальных обучающих участков. Применение этого подхода для пяти предприятий разных типов индустрии и сравнение с другими системами классификации подтверждает его более высокую точность. Для поверхностного источника модель AERMOD более чувствительна к изменению длины шероховатости поверхности, чем к изменению альбедо и параметра Боуэна. Для приподнятого же источника влияние альбедо и параметра Боуэна значительно. Показана применимость использования различных источников данных дистанционного зондирования для классификации поверхности и оценки албедо, параметра Боуэна и шероховатости поверхности. Изучение влияния космической классификации землепользования на концентрацию загрязняющих веществ для пяти предприятий различных отраслей позволило сделать вывод, что уточнение классификации землепользования вокруг предприятия по космическим данным существенно влияет на модельные максимальные разовые концентрации загрязнителей, а через них — на острый риск для здоровья населения.

Литература

1. *Балтер Б. М.*, *Балтер Д. Б.*, *Егоров В. В.*, *Стальная М. В.*, *Фаминская М. В.* Классификация местности по данным ИСЗ Landsat для улучшения точности оценок риска здоровью населения от индустриального загрязнения воздуха // Исслед. Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 49–56.
2. *Балтер Б. М.*, *Егоров В. В.*, *Котцов В. А.*, *Фаминская М. В.* Распознавание категорий наземных объектов на основе корреляционных портретов с применением в модели рассеяния атмосферных

загрязнений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 29–41.
3. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Р 2.1.10.1920-04. Роспотребназдор. М., 2004. 144 с.
4. AERSURFACE User's Guide. US EPA Research Triangle Park, 2008. 104 p.
5. *Arsanjani J. J.* Characterizing and Monitoring Global Landscapes Using GlobeLand30 Datasets: The First Decade of the Twenty-first Century // Intern. J. Digital Earth. 2018. V. 12. P. 642–660. DOI: 10.1080/17538947.2018.1470689.
6. *Arsanjani J. J.*, *See L.*, *Tayyebi A.* Assessing the Suitability of GlobeLand30 for Mapping Land Cover in Germany // Intern. J. Digital Earth. 2016. V. 9. P. 873–891. DOI: 10.1080/17538947.2016.1151956.
7. *Baldinelli G.*, *Bonafoni S.*, *Rotili A.* Albedo Retrieval from Multispectral Landsat 8 Observation in Urban Environment: Algorithm Validation by *in situ* Measurements. // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2017. V. 10. P. 4504–4511. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2721549.
8. *Balter B.*, *Faminskaya M.* Irregularly Emitting Air Pollution Sources: Acute Health Risk Assessment Using AERMOD and the Monte Carlo Approach to Emission Rate // Air Quality, Atmosphere and Health. 2017. V. 10. P. 401–409.
9. *Bo X.*, *Wang G.*, *Tian J.*, *Yang J.*, *Gao X.*, *Huang Y.*, *Li S.* Standard Systems of Surface Parameters in AERMOD // China Environmental Science. 2015. V. 35(9). P. 2570–2575 (in Chinese).
10. *Cho J.*, *Miyazaki S.*, *Yeh P. J. F.*, *Kim W.*, *Kanae S.*, *Oki T.* Testing the Hypothesis on the Relationship between Aerodynamic Roughness Length and Albedo using Vegetation Structure Parameters // Intern. J. Biometeorology. 2012. V. 56(2). P. 411–418. DOI: 10.1007/s00484-011-0445-2.
11. *Faulkner W.*, *Shaw B. W.*, *Grosch T.* Sensitivity of Two Dispersion Models (AERMOD and ISCST3) to Input Parameters for a Rural Ground-Level Area Source // J. Air and Waste Management Association. 2008. V. 58(10). P. 1288–1296. DOI: 10.3155/1047-3289.58.10.1288.
12. *Garcia-Mora T.*, *Mas J. F.*, *Hinkley E. A.* Land Cover Mapping Applications with MODIS: A Literature Review // Intern. J. Digital Earth. 2012. V. 5(1). P. 63–87. DOI: 10.1080/17538947.2011.565080.
13. *Gowda P.*, *Chávez J. L.*, *Howell T. A.*, *Marek T. H.*, *New L. L.* Surface Energy Balance Based Evapotranspiration Mapping in the Texas High Plains // Sensors. 2008. V. 8. P. 5186–5201. DOI: 10.3390/s8085186.
14. *Grosch T.*, *Lee R. F.* Sensitivity of the AERMOD Air Quality Model to the Selection of Land Use Parameters // Trans. Ecology and the Environment. 1999. V. 29. P. 803–812.
15. *Gupta R.*, *Prasad T. S.*, *Vijayan D.* Estimation of Roughness Length and Sensible Heat Flux from WiFS and NOAA AVHRR Data // Advance in Space Research. 2002. V. 29(1). P. 33–38.
16. *He T.*, *Wang D.*, *Qu Y.* Land Surface Albedo // Comprehensive Remote Sensing. V. 5: Earth's Energy Budget / ed. S. Liang. Amsterdam: Elsevier, 2018. P. 140–162.
17. *Isakov V.*, *Venkatram A.*, *Touma J. S.*, *Koracin D.*, *Otte T. L.* Evaluating the Use of Outputs from Comprehensive Meteorological Models in Air Quality Modeling Applications // Atmospheric Environment. 2007. V. 41. P. 1689–1705.
18. *Jiang B.*, *Liang S.*, *Jia A.*, *Xu J.*, *Zhang X.*, *Xiao Z.*, *Zhao X.*, *Jia K.*, *Yao Y.* Validation of the Surface Daytime Net Radiation Product from Version 4.0 GLASS Product Suite // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2018. V. 16(4). P. 509–513. DOI: 10.1109/LGRS.2018.2877625.
19. *Karvounis G.*, *Deligiorgi D.*, *Philippopoulos K.* On the Sensitivity of AERMOD to Surface Parameters under Various Anemological Conditions // Proc. 11th Intern. Conf. Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes / eds. D. J. Carruthers, Ch. A. McHugh. Cambridge Environmental Research Consultants Ltd., 2007. P. 43–47.
20. *Kesarkar A.*, *Dalvi M.*, *Kaginalkar A.*, *Ojhab A.* Coupling of the Weather Research and Forecasting Model with AERMOD for Pollutant Dispersion Modeling. A Case Study for PM10 Dispersion over Pune, India // J. Atmospheric Environment. 2007. V. 41(9). P. 1976–1988.
21. *Kumar A.*, *Dikshit A. K.*, *Fatima S.*, *Patil R. S.* Application of WRF Model for Vehicular Pollution Modelling Using AERMOD // Atmospheric and Climate Sciences. 2015. V. 5. P. 57–62.
22. *Kumar A.*, *Patil R. S.*, *Dikshit A. K.*, *Kumar R.* Application of WRF Model for Air Quality Modelling and AERMOD — A Survey // Aerosol and Air Quality Research. 2017. V. 17. P. 1925–1937.
23. *Liang S.*, *Zhang X.*, *Xiao Z.*, *Cheng J.*, *Liu Q.*, *Zhao X.* Global Land Surface Satellite (GLASS) Products. Algorithms, Validation and Analysis. Springer, 2014.
24. *Lindberg F.*, *Grimmond C. S. B.*, *Gabey A.*, *Huang B.*, *Kent C. W.*, *Sun T.*, *Theeuwes N. E.*, *Jarvi L.*, *Ward H. C.*, *Capel-Timms I.*, *Chang Y.*, *Jonsson P.*, *Krave N.*, *Liu D.*, *Meyer D.*, *Olofson K. F. G.*, *Tan J.*, *Wastberg D.*, *Xue L.*, *Zhang Z.* Urban Multi-Scale Environmental Predictor (UMEP): An Integrated Tool for City-based Climate Services // Environmental Modelling and Software. 2018. V. 99. P. 70–87.
25. *Liu J.*, *Schaaf C.*, *Strahler A.*, *Jiao Z.*, *Shuai Y.*, *Zhang Q.*, *Roman M.*, *Augustine J. A.*, *Dutton E. G.* Validation of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Albedo Retrieval Algorithm: Dependence of Albedo on Solar Zenith Angle // J. Geophysical Research. 2009. V. 114(D1). D01106. DOI: 10.1029/2008JD009969.

26. *Long G.*, *Cordova J. F.*, *Tanrikulu S.* An Analysis of AERMOD Sensitivity to Input Parameters in the San Francisco Bay Area // Proc. 13th Joint Conf. Applications of Air Pollution Meteorology with the Air and Waste Management Association. Pittsburgh, PA: A&WMA, 2004. P. 203–206.
27. *Malek E.* Comparison of the Bowen Ratio-energy Balance and Stability-Corrected Aerodynamic Methods for Measurement of Evapotranspiration // Theoretical and Applied Climatology. 1993. V. 48. P. 167–178.
28. *Pape M.*, *Vohland M.* A Comparison of Total Shortwave Surface Albedo Retrievals from MODIS and TM Data // ISPRS TC VII Symp. Vienna, Austria: IAPRS, 2010. V. 38. P. 447–451.
29. *Pascal M.*, *Vondou A. D.*, *Francois M. K.* Case Study of Pollutants Concentration Sensitivity to Meteorological Fields and Land Use Parameters over Douala Using AERMOD Dispersion Model // Atmosphere. 2011. V. 2(4). P. 715–741.
30. *Pongprueksa P.*, *Chatchupong T.* High Resolution Land Cover Data for Thailand's Air Quality Impact Assessment // 5th Intern. Conf. Environmental Engineering, Science and Management. Bangkok, Thailand. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.4427.8642.
31. *Qu Y.*, *Qiang L.*, *Liang S.*, *Wang L.*, *Liu N.*, *Liu S.* Direct-Estimation Algorithm for Mapping Daily Land-Surface Broadband Albedo from MODIS Data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2014. V. 52. P. 907–919.
32. *Srivastava H.*, *Patel P.*, *Navalgund R. R.*, *Sharma Y.* Retrieval of Surface Roughness Using Multi-polarized Envisat-1 ASAR Data // Geocarto Intern. 2008. V. 23(1). P. 67–77. DOI: 10.1080/10106040701538157.
33. *Tadono T.*, *Nagai H.*, *Ishida H.*, *Oda F.*, *Naito S.*, *Minakawa K.*, *Iwamoto H.* Generation of the 30 m-Mesh Global Digital Surface Model by ALOS PRISM // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. XLI-B4. P. 157–162. URL: https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-157-2016.
34. *Verhoes N.*, *Lievens H.* Soil Moisture Retrieval from Synthetic Aperture Radar: Facing the Soil Roughness Parameterization Problem // Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content / ed. G. P. Petropoulos. Boca Raton: CRC Press, 2014. P. 323–344.
35. *Zhang F.*, *Sha M.*, *Wang G.*, *Li Z.*, *Shao Y.* Urban Aerodynamic Roughness Length Mapping Using Multitemporal SAR Data // Advances in Meteorology. 2017. Art. No. 8958926. DOI: 10.1155/2017/8958926.

Space observations of surface parameters for AERMOD modeling of industrial air pollution. Part 1. Literature review, data, land use classification

B. M. Balter [1], D. B. Balter [1], V. V. Egorov [1], M. V. Stalnaya [1], M. V. Faminskaya [2]

[1] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: victor_egorov@mail.ru
[2] *Russian State Social University, Moscow 129226, Russia*
E-mail: faminskaya@mail.ru

In the work, the AERMOD industrial pollution dispersion model is enhanced with remote sensing observations and climatic models based on them. The focus is on the three surface parameters (albedo, roughness, Bowen ratio) and on land use classification on which it depends. We model maximum hourly concentrations and the resulting acute health risk and assess the effect produced by using remote sensing data for local areas around industrial plants instead of global standard AERMOD parameters. In this part of the publication, we review the research on extracting the AERMOD-related surface parameters from space remote sensing data and the published data about the effect of their usage on model concentrations. Then, the data we used in our research of this problem (five real multi-source plants) and the approach to measuring the effect of remote sensing data are described. The effect on each plant's critical pollutant is measured in three ways: a) as difference between the yearly maxima of hourly concentrations of a critical pollutant ("absolute"); b) the same limited to daytime workhours and 95 % quantile instead of absolute maximum ("regulatory"); c) as maximum hourly difference over a year ("instant"). The measure of effect is divided either by the reference concentration of the pollutant, which yields the impact on health risk, or by the concentration obtained with AERMOD standards, which yields a relative measure of impact. In this part of the publication, we focus on the effect of using remote sensing for land use classification. It is considerable for all three criteria used a)–c).

Keywords: AERMOD, pollutant dispersion model, albedo, roughness, Bowen parameter, land use classification, maximal hourly concentrations, Landsat, ALOS, GLASS, ERA5

Accepted: 09.12.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-97-111

References

1. Balter B., Balter D., Egorov V., Stalnaya M., Faminskaya M., Landsat Land Use Classification for Assessing Health Risk from Industrial Air Pollution, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, No. 9, pp. 1334–1340.
2. Balter B. M., Egorov V. V., Kottsov V. A., Faminskaya M. V., Recognition of Earth surface categories based on correlation portraits and its use in modeling atmospheric pollution dispersion, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 29–41 (in Russian).
3. *Human Health Risk Assessment from Environmental Chemicals*, *Rospotrebnadzor Guidelines No. 2.1.10.1920-04*, Moscow, 2004, 144 p. (in Russian).
4. *AERSURFACE User's Guide*, US EPA Research Triangle Park, 2008, 104 p.
5. Arsanjani J. J., Characterizing and Monitoring Global Landscapes Using GlobeLand30 Datasets: The First Decade of the Twenty-first Century, *Intern. J. Digital Earth*, 2018, Vol. 12, pp. 642–660, DOI: 10.1080/17538947.2018.1470689.
6. Arsanjani J. J., See L., Tayyebi A., Assessing the Suitability of GlobeLand30 for Mapping Land Cover in Germany, *Intern. J. Digital Earth*, 2016, Vol. 9, pp. 873–891, DOI: 10.1080/17538947.2016.1151956.
7. Baldinelli G., Bonafoni S., Rotili A., Albedo Retrieval from Multispectral Landsat 8 Observation in Urban Environment: Algorithm Validation by *in situ* Measurements, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, pp. 4504–4511, DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2721549.
8. Balter B., Faminskaya M., Irregularly Emitting Air Pollution Sources: Acute Health Risk Assessment Using AERMOD and the Monte Carlo Approach to Emission Rate, *Air Quality*, *Atmosphere and Health*, 2017, Vol. 10, pp. 401–409.
9. Bo X., Wang G., Tian J., Yang J., Gao X., Huang Y., Li S., Standard Systems of Surface Parameters in AERMOD, *China Environmental Science*, 2015, Vol. 35(9), pp. 2570–2575 (in Chinese).
10. Cho J., Miyazaki S., Yeh P. J. F., Kim W., Kanae S., Oki T., Testing the Hypothesis on the Relationship Between Aerodynamic Roughness Length and Albedo using Vegetation Structure Parameters, *Intern. J. Biometeorology*, 2012, Vol. 56(2), pp. 411–418, DOI: 10.1007/s00484-011-0445-2.
11. Faulkner W., Shaw B. W., Grosch T., Sensitivity of Two Dispersion Models (AERMOD and ISCST3) to Input Parameters for a Rural Ground-Level Area Source, *J. Air and Waste Management Association*, 2008, Vol. 58(10), pp. 1288–1296, DOI: 10.3155/1047-3289.58.10.1288.
12. Garcia-Mora T., Mas J. F., Hinkley E. A., Land Cover Mapping Applications with MODIS: A Literature Review, *Intern. J. Digital Earth*, 2012, Vol. 5(1), pp. 63–87, DOI: 10.1080/17538947.2011.565080.
13. Gowda P., Chávez J. L., Howell T. A., Marek T. H., New L. L. New L. L., Surface Energy Balance Based Evapotranspiration Mapping in the Texas High Plains, *Sensors*, 2008, Vol. 8, pp. 5186–5201, DOI: 10.3390/s8085186.
14. Grosch T., Lee R. F., Sensitivity of the AERMOD Air Quality Model to the Selection of Land Use Parameters, *Trans. Ecology and the Environment*, 1999, Vol. 29, pp. 803–812.
15. Gupta R., Prasad T. S., Vijayan D., Estimation of Roughness Length and Sensible Heat Flux from WiFS and NOAA AVHRR Data, *Advance in Space Research*, 2002, Vol. 29(1), pp. 33–38.
16. He T., Wang D., Qu Y., Land Surface Albedo, *Comprehensive Remote Sensing. Vol. 5: Earth's Energy Budget*, S. Liang (ed.), Amsterdam: Elsevier, 2018, pp. 140–162.
17. Isakov V., Venkatram A., Touma J. S., Koracin D., Otte T. L., Evaluating the Use of Outputs from Comprehensive Meteorological Models in Air Quality Modeling Applications, *Atmospheric Environment*, 2007, Vol. 41, pp. 1689–1705.
18. Jiang B., Liang S., Jia A., Xu J., Zhang X., Xiao Z., Zhao X., Jia K., Yao Y., Validation of the Surface Daytime Net Radiation Product from Version 4.0 GLASS Product Suite, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, Vol. 16(4), pp. 509–513, DOI: 10.1109/LGRS.2018.2877625.
19. Karvounis G., Deligiorgi D., Philippopoulos K., On the Sensitivity of AERMOD to Surface Parameters under Various Anemological Conditions, *Proc. 11th Intern. Conf. Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, D. J. Carruthers, Ch. A. McHugh (eds.), Cambridge Environmental Research Consultants Ltd., 2007, pp. 43–47.
20. Kesarkar A., Dalvi M., Kaginalkar A., Ojhab A., Coupling of the Weather Research and Forecasting Model with AERMOD for Pollutant Dispersion Modeling. A Case Study for PM10 Dispersion over Pune, India, *J. Atmospheric Environment*, 2007, Vol. 41(9), pp. 1976–1988.

21. Kumar A., Dikshit A. K., Fatima S., Patil R. S., Application of WRF Model for Vehicular Pollution Modelling Using AERMOD, *Atmospheric and Climate Sciences*, 2015, Vol. 5, pp. 57–62.
22. Kumar A., Patil R. S., Dikshit A. K., Kumar R., Application of WRF Model for Air Quality Modelling and AERMOD — A Survey, *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, Vol. 17, pp. 1925–1937.
23. Liang S., Zhang X., Xiao Z., Cheng J., Liu Q, Zhao X., *Global Land Surface Satellite (GLASS) Products. Algorithms, Validation and Analysis*, Cham: Springer, 2014.
24. Lindberg F., Grimmond C. S. B., Gabey A., Huang B., Kent C. W., Sun T., Theeuwes N. E., Jarvi L., Ward H. C., Capel-Timms I., Chang Y., Jonsson P., Krave N., Liu D., Meyer D., Olofson K. F. G., Tan J., Wastberg D., Xue L., Zhang Z., Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An Integrated Tool for City-based Climate Services, *Environmental Modelling and Software*, 2018, Vol. 99, pp. 70–87.
25. Liu J., Schaaf C., Strahler A., Jiao Z., Shuai Y., Zhang Q., Roman M., Augustine J. A., Dutton E. G., Validation of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Albedo Retrieval Algorithm: Dependence of Albedo on Solar Zenith Angle, *J. Geophysical Research*, 2009, Vol. 114(D1), D01106, DOI: 10.1029/2008JD009969.
26. Long G., Cordova J. F., Tanrikulu S., An Analysis of AERMOD Sensitivity to Input Parameters in the San Francisco Bay Area, *Proc. 13th Joint Conf. Applications of Air Pollution Meteorology with the Air and Waste Management Association*, Pittsburgh, PA: A&WMA, 2004, pp. 203–206.
27. Malek E., Comparison of the Bowen Ratio-energy Balance and Stability-Corrected Aerodynamic Methods for Measurement of Evapotranspiration, *Theoretical and Applied Climatology*, 1993, Vol. 48, pp. 167–178.
28. Pape M., Vohland M., A Comparison of Total Shortwave Surface Albedo Retrievals from MODIS and TM Data, *ISPRS TC VII Symp.*, Vienna, Austria: IAPRS, 2010, Vol. 38, pp. 447–451.
29. Pascal M., Vondou A. D., Francois M. K., Case Study of Pollutants Concentration Sensitivity to Meteorological Fields and Land Use Parameters over Douala (Cameroon) Using AERMOD Dispersion Model, *Atmosphere*, 2011, Vol. 2(4), pp. 715–741.
30. Pongprueksa P., Chatchupong T., High Resolution Land Cover Data for Thailand's Air Quality Impact Assessment, *5th Intern. Conf. Environmental Engineering*, *Science and Management*, Bangkok, Thailand, 2016, DOI: 10.13140/RG.2.1.4427.8642.
31. Qu Y., Qiang L., Liang S., Wang L., Liu N., Liu S., Direct-Estimation Algorithm for Mapping Daily Land-Surface Broadband Albedo from MODIS Data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52(2), pp. 907–919.
32. Srivastava H., Patel P., Navalgund R. R., Sharma Y., Retrieval of Surface Roughness Using Multi-polarized Envisat-1 ASAR Data, *Geocarto Intern.*, 2008, Vol. 23(1), pp. 67–77, DOI: 10.1080/10106040701538157.
33. Tadono T., Nagai H., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H., Generation of the 30 m-Mesh Global Digital Surface Model by ALOS PRISM, *Intern. Archives of the Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, XLI-B4, pp. 157–162, available at: https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-157-2016.
34. Verhoes N., Lievens H., Soil Moisture Retrieval from Synthetic Aperture Radar: Facing the Soil Roughness Parameterization Problem, *Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content*, G. P. Petropoulos (ed.), Boca Raton: CRC Press, 2014, pp. 323–344.
35. Zhang F., Sha M., Wang G., Li Z., Shao Y., Urban Aerodynamic Roughness Length Mapping Using Multitemporal SAR Data, *Advances in Meteorology*, 2017, Art. No. 8958926, DOI: 10.1155/2017/8958926.