Данные космических наблюдений параметров поверхности и их реанализа в модели рассеяния индустриальных загрязнений воздуха AERMOD. Часть 2. Альбедо, шероховатость поверхности и параметр Боуэна

Б. М. Балтер¹, Д. Б. Балтер¹, В. В. Егоров¹, М. В. Стальная¹, М. В. Фаминская²

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: victor_egorov@mail.ru ² Российский государственный социальный университет, Москва, 129226, Россия E-mail: faminskava@mail.ru

Модель дисперсии индустриального загрязнения воздуха AERMOD уточняется с помощью наблюдений дистанционного зондирования. Настоящая статья сфокусирована на трёх параметрах поверхности, влияющих на рассеяние загрязнений (альбедо, шероховатость поверхности и коэффициент Боуэна). Альбедо и шероховатость поверхности оцениваются по дистанционным наблюдениям напрямую, а коэффициент Боуэна требует косвенных оценок тепловых потоков или использования включающих их климатических моделей. Оценивается эффект от привлечения этих новых данных, специфичных для каждой территории, вместо глобальных стандартов AERMOD. Эффект уточнения параметров поверхности рассматривается для трёх реальных предприятий и 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, определяющую предельную допустимую его концентрацию, что даёт меру влияния на оценку острого риска, либо на концентрацию по стандартам AERMOD, что даёт относительную меру влияния космических данных. Для первого критерия преобладает влияние шероховатости, а влияние альбедо и параметра Боуэна мало. Для второго влияние шероховатости менее заметно, а влияние альбедо и параметра Боуэна значительно. Для третьего критерия влияние становится существенным для всех трёх параметров. Обсуждается возможность использования этих новых данных для уточнения санитарнозащитных зон.

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

Одобрена к печати: 10.12.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-121-137

Введение

Применение космических данных о параметрах земной поверхности для моделирования рассеяния индустриального загрязнения с помощью программного комплекса AERMOD представляется весьма важной и актуальной задачей. Настоящая публикация служит продолжением работы (Балтер и др., 2021), где дан обзор литературы по извлечению из космических данных параметров, необходимых для AERMOD, сформулированы критерии DiffFirst («мгновенный»), DiffLast («абсолютный») и Day95% («регуляторный») для измерения эффекта привлечения этих данных к моделированию рассеяния индустриальных загрязнений. Кроме того, в упомянутой работе рассмотрено влияние на модельные концентрации загрязнителей космических данных, относящихся к классификации землепользования. В настоящей части работы рассматривается влияние на модельные концентрации загрязнителей космических данных для альбедо, шероховатости поверхности и параметра Боуэна. Влияние указанных параметров на моделирование концентраций вредных выбросов оценивается для

ряда промышленных предприятий, каждое из которых — с набором разнообразных источников. С этой целью выбраны два объекта, рассматриваемые в первой части работы (Балтер и др., 2021): коксохимический завод под Москвой (предприятие 1) и очистная станция на юге России (предприятие 2). В *табл. 1* дополнительно представлены данные для металлургического завода в Приуралье (Балтер и др., 2017) (предприятие 3).

Цель статьи — оценка влияния данных дистанционного зондирования, используемых для определения значений альбедо земной поверхности, её неровностей, а также параметра Боуэна, на модельные концентрации воздушных загрязнителей на примере конкретных промышленных предприятий.

В заключении дана сравнительная оценка эффекта привлечения космических данных для параметров, рассмотренных в обеих частях работы ((Балтер и др., 2021) и настоящая статья).

Влияние альбедо на модельные концентрации AERMOD

В работе проведено сравнение сезонной динамики альбедо, построенной по данным GLASS (Global Land Atmosphere System Study) и искусственного спутника Земли Landsat LC8, с сезонной динамикой по стандартам AERSURFACE, что показано на *puc. 1*.



Рис. 1. Альбедо по данным GLASS и Landsat в сравнении со стандартами AERSURFACE. *Вверху* — предприятие 1; *внизу* — предприятие 2. Для всей территории 10×10 км приведены точки, усреднённые по 8-дневным интервалам и по 2013–2017 гг., и интерполяция их сезонной динамики полиномиальной регрессией 4-го порядка. Для данных Landsat LC8 приведены точки по дням года, соответствующие датам съёмки за 2017–2019 гг.

Для GLASS это сделано для квадрата 10×10 км вокруг предприятия, согласно требованиям AERMOD к альбедо, и с усреднением по 8-дневным интервалам и по 2013–2017 гг. Для Landsat благодаря лучшему пространственному разрешению есть возможность разделения альбедо между классами земного покрова: городским и растительным (Балтер и др., 2021). Однако точек по времени меньше: это только относительно безоблачные даты съёмки Landsat. GLASS и Landsat показывают заметное увеличение альбедо летом, которое отсутствует в стандартах AERSURFACE. Абсолютные значения альбедо обычно меньше, чем в AERSURFACE, на ~0,05 для обоих рассматриваемых предприятий; ниже мы оценим влияние, которое это может оказать на модельные концентрации. Зимние значения наиболее проблематичны из-за облачности; для предприятия 1 они более или менее соответствуют значениям AERSURFACE, в то время как для предприятия 2 разница значительна, возможно, из-за гораздо меньшего количества снежных зим в регионе. Таким образом, использование космических наблюдений вносит существенные коррективы сравнительно со стандартами AERSURFACE как в абсолютные значения альбедо, так и в изменение альбедо по сезонам, причём эти коррективы специфичны для каждой из двух рассматриваемых территорий.



Рис. 2. Альбедо по стандартам AERSURFACE, Landsat и GLASS. Размер каждой из шести территорий 10×10 км дан в линейном масштабе

На *рис. 2* показаны карты зимнего альбедо для предприятия 1 и летнего альбедо для предприятия 2. Карта для AERSURFACE — результат применения стандартных значений к классификации землепользования, а карты для GLASS и Landsat отражают прямые наблюдения. Для предприятия 1 имеется существенная разница в оценках альбедо по GLASS, Landsat, сопоставимая с разницей между этими оценками и стандартами AERSURFACE. Эта разница зависит от категории землепользования и особенно существенна для леса. Она значительнее зимой, а летом несколько сглаживается (карты не приводятся). Для предприятия 2 оценки альбедо по GLASS и Landsat сопоставимы и значительно отличаются от стандартов AERSURFACE. Таким образом, вопрос о том, какой тип данных дистанционного зондирования использовать вместо стандартов AERSURFACE, должен решаться специфичным образом для каждой территории. Здесь и далее применяется схема цветового кодирования «радуга» (Балтер и др., 2021) и указывается уровень, превышение которого показано красным цветом. 10 % этого уровня отображается фиолетовым цветом, а значения ниже 10 % не окрашены.

В *табл.* 1 приведены сводные данные результатов моделирования масштаба загрязнений для трёх предприятий (к рассматриваемым предприятиям добавлено предприятие 3): с использованием стандартов альбедо AERSURFACE, обозначенных как STD, и альбедо из данных Landsat или GLASS (в зависимости от предприятия), обозначенных как LC8G. Для оценки использования дистанционных данных LC8G к модельным максимальным почасовым концентрациям применяются три меры воздействия: DiffFirst, DiffLast и Day95%. Эффект взят по абсолютному значению и показан относительно острой референтной концентрации RFC_{ас} (Руководство..., 2004) и относительно STD. Сравниваются региональные максимумы годовых максимумов либо сначала проводится сравнение для каждой ячейки, а затем берётся максимум разности по каждому региону.

Таблица 1. Абсолютная разность межд	у максимальными часовыми концентрациями критичных загряз-
нителей, рассчитанная по стандартам	1 AERSURFACE (STD) и по данным Landsat-8 или GLASS для
	альбедо (LC8G)

Пред- приятие	RFC _{ac} , мг∙м ⁻³	STD-LC8G RFC _{ac}	STD-LC8G STD	STD-LC8G RFC _{ac}	STD-LC8G STD	STD-LC8G RFC _{ac}	STD-LC8G STD	
		DiffFirst	DiffFirst	DiffLast	DiffLast	Day95%	Day95%	
		Cpee	днее по районам	вне санитарно	э-защитной зон	lbl		
1*	0,3	0,15	0,11	0,035	0,02	0,0013	0,15	
2*	0,2	0,56	0,55	0,009	0,008	0,027	0,17	
3**	0,3	0,21	0,15 0,028 0,02		0,02	0,0084	0,0097	
Критичный район								
1*	0,3	0,37	0,12	0,25	0,08	0,0003	0,0035	
2*	0,2	2,6	0,53	0,02	0,045	0,26	0,16	
3**	0,3	1	0,35	0,029	0,07	0,031	0,011	

* — различия между региональными максимумами;

** — региональные максимумы клеточных различий.

Эффект использования данных космических наблюдений/реанализа для альбедо оказывается наибольшим, если его измерять с помощью DiffFirst: он сопоставим с RFC_{ас} для каждого предприятия. Однако, за исключением критичного региона для предприятия 1, эффект, измеряемый таким образом, составляет всего несколько процентов RFC_{ас}, что согласуется с оценками других авторов, рассмотренными в работе (Балтер и др., 2021). В большинстве случаев этим небольшим уточнением модельных концентраций можно пренебречь. В некоторых ситуациях критерий Day95% становится более актуальным, чем DiffLast, как мера эффекта привлечения дистанционных данных. Его отношение к DiffLast различно для разных предприятий: для предприятия 1 эффект дистанционных данных по Day95% ещё меньше, чем по DiffLast, но для предприятий 2 и 3 эффект по Day95% больше и для критичного района предприятия 2 он существен. Общий вывод таков: в большинстве случаев, когда применяется «абсолютный» критерий DiffLast, эффект привлечения данных дистанционного зондирования альбедо к моделированию рассеяния загрязнений незначителен, но ситуация может быть иной для некоторых наиболее критичных районов (обычно ближайших к предприятию жилых районов) и в случаях, когда более уместным критерием становится «регуляторный» критерий Day95%. По критерию DiffFirst эффект привлечения данных дистанционного зондирования для альбедо, как правило, существенный, но этот критерий имеет скорее исследовательский, чем регуляторный (управленческий) смысл при принятии решений по управлению выбросами.

На *рис. 3* показаны результаты для критериев DiffFirst, DiffLast и Day95% в виде карт, в которых используется цветовое кодирование «радуга» (см. выше).



Рис. 3. Абсолютная разница между годовыми максимумами критичных загрязнителей для предприятий 1 и 2. Различия менее 0,1 уровня красного не показаны

Н₀ 0−240 Вт•м⁻², 2013 г.





Рис. 4. Диаграмма почасовых (абсцисса) и суточных (*сверху вниз*: дни, 2013 г.) значений: *a* — потока тепла *H*₀; *б* — модельных концентраций для стандартов AERSURFACE; *в* — разности концентраций между стандартами AERSURFACE и значениями, основанными на альбедо по GLASS; *г* — различий в концентрации между стандартами AERSURFACE и значениями, основанными на параметре Боуэна по GLASS

Для DiffFirst значения больше, чем для двух других критериев, примерно на порядок, что отражено в менее чувствительной схеме цветокодирования. Эффект по DiffFirst сконцентрирован вокруг предприятия. Значения эффекта по Day95% для предприятия 2 сконцентрированы около предприятия, а для предприятия 1 они более разбросаны. Таким образом, про-

странственное распределение эффекта использования дистанционных данных для альбедо зависит от типа предприятия, территории и применяемых критериев.

Почасовая зависимость эффекта привлечения дистанционных данных по альбедо показывает причины слабого влияния альбедо на модельную концентрацию. На *рис.* 4 (см. с. 126) для предприятия 1 показан тепловой поток H_0 в качестве индикатора конвективных дневных режимов рассеяния ($H_0 > 0$, показаны чёрным). Абсцисса — час дня, ордината — день 2013 г. (начиная сверху). Максимальные разовые концентрации для критичного района (диаграмма STD) имеют место в основном для $H_0 < 0$, в то время как наибольшее влияние данных GLASS характерно для $H_0 > 0$, что почти не влияет на пики концентрации.

Влияние шероховатости поверхности на модельные концентрации AERMOD

При подходе к расчёту шероховатости поверхности были использованы некоторые уроки, извлечённые из работ (Kent et al., 2019; Simpson et al., 2012). Для шероховатости застроенные и незастроенные (покрытые растительностью) территории обрабатываются по-разному. Они разделяются на основе классификации землепользования по данным Landsat, описанной в работе (Балтер и др., 2021). Для нелесной растительности используется формула из работы (Gupta et al., 2002), связывающая шероховатость с NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) в данных Landsat. Поскольку многолетние данные Landsat довольно изменчивы от даты к дате, проводилось сглаживание их сезонной зависимости полиномом. Для леса формула даёт слишком малые значения. Нами была принята часто используемая аппроксимация шероховатости леса величиной 0,1 от средней высоты леса. Высота леса оценивается по данным ALOS (Advanced Land Observing Satellite) DEM (Digital Elevation Model) следующим образом. Карта высоты рельефа сканируется с помощью скользящего «большого» окна размером 7×7 пикселей, которое подразделяется на «малые» подокна размером 3×3 пикселя каждое. Для каждой позиции большого окна, в каждом маленьком окне внутри него выполняется операция оценки высоты по абсолютному значению DEM или по изменчивости этого значения внутри окна, показанная в первом столбце табл. 2. Затем результаты всех малых окон агрегируются в одно значение для большого окна, как показано в первой строке *табл. 2.* Для высоты леса и операция малого окна, и операция агрегирования были типа «минимум». В результате получилось сглаженное изображение, которое на границах леса аппроксимирует уровень почвы вне леса. Вычитание этого изображения из исходной матрицы высот даёт высоту леса на его границе. При этом игнорируются значения <7 м, которые в основном соответствуют границам, не связанным с лесом. Затем проводится интерполяция высоты леса от границ внутрь лесных участков. Далее высота пересчитывается в шероховатость умножением на 0,1. Необходимо было также ввести сезонную зависимость шероховатости, поскольку ALOS DEM — без сезонной динамики. К значению шероховатости, принятому на основе ALOS в качестве максимальной величины для летнего сезона, был применён коэффициент сезонных изменений, взятый из стандартов AERSURFACE.

Таблица 2. Виды двумерного скользящего окна, используемого для оценки шероховатости леса и зданий. Колонка: операция, выполняемая в малом окне; строка: операция, выполняемая при агрегации малых окон в большое окно

Малое окно	Большое окно				
	Минимум	Среднее	95—5%-й квантиль		
Значение в отдельном пикселе			+		
Среднеквадратичная вариация		+			
Разница квантилей 95–5 %		+			
Минимум	+	+			

Результирующая сезонная зависимость шероховатости показана на *puc.* 5 для предприятия 1 для всех типов растительности.



Рис. 5. Сезонная динамика шероховатости (СКО) для предприятия 1 по типам растительности: стандарты AERSURFACE (чёрные линии) и оценки по Landsat NDVI и ALOS DEM (серые линии). Интерполировано по сезонам. Логарифмическая шкала



Рис. 6. Полные карты шероховатости для предприятий 1 и 2: *слева* — построенные по Landsat NDVI для нелесной растительности и ALOS DEM для леса и зданий; *справа* — построенные по классификации Landsat со стандартами AERSURFACE

В данных ALOS DEM чётко выделяются застроенные территории. Для расчёта высоты застройки по ALOS DEM была использована та же процедура скользящего окна, что и для леса. Операция в малом окне — среднеквадратичная вариация (ввиду того, что в отличие от леса при разрешении ALOS DEM в данных чередуются высота зданий и высота поверхности в промежутках между зданиями), операция в большом окне — усреднение (см. *табл. 2*). Для приведения этих результатов к абсолютным значениям высоты зданий использовалась регрессия между высотами, рассчитанными на основе ALOS DEM, и высотами зданий в базе данных Open Street Map (OSM). Регрессия имеет удовлетворительный коэффициент $R^2 \approx 0.9$. После пересчёта высот ALOS DEM в высоты OSM применялся коэффициент 0,1 для преобразования высоты в шероховатость.

Совокупную шероховатость растительности по Landsat NDVI и зданий по ALOS DEM показывает *рис. 6* (см. с. 128) в сравнении с картой шероховатости, построенной на основе стандартов AERSURFACE, применённых к классификации категорий землепользования по Landsat. Для предприятия 1 особенно заметно увеличение шероховатости ALOS DEM по сравнению со стандартами AERSURFACE в зимний сезон в северной половине секторов (азимуты $270-90^{\circ}$ от предприятия). Для предприятия 2 наиболее заметно увеличение шероховатости в южных секторах (азимуты $150-210^{\circ}$ от предприятия) во все сезоны. Как правило, увеличенная шероховатость приводит к снижению максимальных разовых концентраций при соответствующих направлениях ветра.

В *табл. 3* приведена сводная информация о расчётных максимальных разовых концентрациях критичных загрязняющих веществ для предприятий 1 и 2. В ней сравниваются концентрации, полученные с использованием стандартных данных AERSURFACE по шероховатости и данных, полученных из Landsat и ALOS DEM, как описано выше. Влияние шероховатости сравнимо с влиянием альбедо, если их измерять с помощью DiffFirst. С другой стороны, если измерять по «регуляторному» критерию DiffLast, эффект привлечения космических данных для шероховатости намного больше — на порядок, — чем аналогичный эффект для альбедо. Это связано с тем, что эффект шероховатости проявляется как в устойчивой, так и в конвективной атмосфере, и днём, и ночью. Другое следствие этого — переход к критерию Day95%, снижающему роль пиковых устойчивых и ночных концентраций по сравнению с DiffLast, меньше сказывается на эффекте данных о шероховатости, чем на эффекте данных об альбедо.

Пред- приятие	RFC _{ac} , мг∙м ⁻³	STD-LC8G	STD-LC8G	STD-LC8G	STD-LC8G	STD-LC8G	STD-LC8G	
		DiffEirct	DiffEirct	$\operatorname{DiffLact}$	DiffLact	Dav05%	Dov05%	
		Difffist	Diminist	DiilLast	DiilLast	Day9570	Day9570	
Среднее по регионам вне санитарно-защитной зоны								
1	0,3	0,45	0,33	0,23	0,12	0,026	0,59	
2	0,2	0,203	0,19	0,117	0,11	0,032	0,35	
Критичный регион								
1	0,3	1,4	0,36	0,42	0,095	0,05	0,65	
2	0,2	0,683	0,099	0,457	0,066	0,21	0,15	

Таблица 3. Абсолютная разность между максимальными часовыми концентрациями критичных загрязнителей, рассчитанная по стандартам AERSURFACE (STD) и по данным Landsat-8 + ALOS DEM (LC8) для шероховатости

Рисунок 7 (см. с. 130) показывает результаты в виде карт. И в критерии DiffFirst, и в DiffLast существует значительная территория, где эффект данных Landsat+ALOS для шеро-ховатости значим (>0,1RFC_{ac}). Это контрастирует с ситуацией для альбедо, где нет значимых эффектов вне санитарно-защитной зоны (C33).



Рис. 7. Абсолютная разность между годовыми максимумами критичных загрязнителей для предприятий 1 и 2. Красный цвет: \geq RFC_{ac}; различия менее 0,1RFC_{ac} не показаны

Влияние параметра Боуэна на модельные концентрации AERMOD

Получение параметра Боуэна из космических наблюдений требует создания модели теплового потока между атмосферой и поверхностью. Поэтому следует опираться не на прямые космические наблюдения, а на данные реанализа, в частности интегрированного в климатические модели. Рассматриваются два разных источника информации о параметре Боуэна: модели поверхностного теплового баланса и модели вертикального атмосферного профиля. Первый подход продемонстрирован для предприятий 1 и 2, второй — для предприятия 2. Первый подход в виде, реализованном для предприятия 1, оказывается более сложным и включает в себя данные Landsat и/или данные реанализа GLASS (Jiang et al., 2018; Liang et al., 2014), данные с местных метеорологических станций и некоторые полуэмпирические формулы. Реализация первого подхода для предприятия 2 проще и использует только данные GLASS, но имеет худшее пространственное разрешение. Второй подход использует только данные реанализа из ERA5 (Hersbach, Dee, 2016; Hersbach et al., 2019) и имеет промежуточное пространственное разрешение $(0,125^{\circ})$, более или менее соответствующее размеру области 10×10 км, характеризуемой параметром Боуэна в AERMOD. При первом подходе получается карта параметра Боуэна, и таким образом, можно рассчитать его геометрическое, а не арифметическое среднее значение, как рекомендовано AERSURFACE, так как мы имеем дело с нормализованными значениями. Во втором подходе имеется единственное значение для всей области.

Логика расчётов для предприятия 1 следует формулам, которые приведены в работе (Liang et al., 2019).

Чистое излучение R_n рассчитывается по известной формуле:

$$R_n = S_{down}(1 - r_0) + \varepsilon_a \sigma T_a^4 - (1 - \varepsilon_s)\varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4,$$

где S_{down} — это падающее на поверхность коротковолновое излучение; r_0 — альбедо поверхности; ε_a — излучательная способность атмосферы; ε_s — излучательная способность поверхности; T_a — температура воздуха; T_s — температура поверхности; σ — постоянная Стефана — Больцмана.

Параметры, которые входят в эту формулу, рассчитываются следующим образом.

$$S_{dowm} = \tau S_{TOA},$$

где коротковолновое излучение S_{TOA} в верхней части атмосферы рассчитывается из зенитного угла местного Солнца θ и коэффициента пропускания τ . Коэффициент пропускания τ рассчитывается либо по количеству солнечных часов *n* в *N*-часовой день: $\tau = a_s + b_s n/N$ (a_s и b_s — эмпирические коэффициенты), либо по содержанию влаги в воздухе *W*, мм:

$$\tau = 0.35 + 0.627 \exp\left[\frac{-0.00146P_0}{K_{turb}/\cos\theta} - 0.075 \left(\frac{W}{\cos\theta}\right)^{0.4}\right], \quad W = 0.014e_d P_0 + 2.1, \text{ где } e_d - \text{давление пара},$$

мбар; P_0 — атмосферное давление, кПа; K_{turb} — эмпирический коэффициент мутности атмосферы; $r_0 = \tau r$, здесь r — альбедо по космическим наблюдениям; $\varepsilon_d = 1,24 (e_d/T_a)^{1/7}$ или $\varepsilon_a = 0,85(-\ln(\tau))^{0.09}$; $\varepsilon_s = 1,009 + 0,047 \ln(\text{NDVI})$, если NDVI > 0,16; $\varepsilon_s = 0,92$ в остальных случаях.

$$T_s = \varepsilon_s^{-1/4} T_{rad},$$

где температура излучения поверхности T_{rad} рассчитывается на основе тепловых каналов 10 и 11 Landsat или берётся из данных GLASS. Температура T_a берётся с местной метеостанции.

Тепловой поток в почву рассчитывается по работе (Bastiaanssen, Roebeling, 1993) как:

$$G = \frac{R_n(T_s - 273, 15) \cdot (0, 32r + 0, 62r^2) \cdot (1 - 0, 98\text{NDVI}^4)}{100r^{day}},$$

где $r^{day} = 1, 1r_0$ — среднее альбедо для времени суток, когда имеется теплопоток, уходящий в почву. Другой вариант: $G = R_n \cdot 0.58 \exp(-2.13 \text{ NDVI})$.

Явный тепловой поток H_0 рассчитывается как $H_0 = \rho_a c_p (T_s - T_a)/r_{ah}$, где $\rho_a -$ плотность; $c_p -$ теплоёмкость воздуха, а теплопроводность приземного воздуха для растительности r_{ah} рассчитывается по методике SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998a, b): $r_{ah} = \rho_a c_p (T_s - T_{95\%}^{5\%})/(R_n - G)$, где $T_{95\%}^{5\%}$ обозначает *b*-й квантиль распределения температуры почвы, взятый для *a*-го квантиля распределения NDVI на диаграмме NDVI- T_s , построенной в SEBAL.

ля распределения NDVI на диаграмме NDVI– T_s , построенной в SEBAL. Наконец, параметр Боуэна B_o рассчитывается как $B_o = H_0/(R_n - G - H_0)$, где знаменатель — скрытый тепловой поток *LE*.

Логика расчётов по GLASS для предприятия 2 следующая.

Тепловой поток H_0 рассчитывается как $H_0 = R_n - G - LE$, где R_n извлекается из данных реанализа GLASS для широт <50° с.ш. с разрешением 0,05° и периодичностью в один день, а LE — скрытая теплота, извлекаемая из GLASS с разрешением 1 км и периодичностью в 8 дней. Тепловой поток G вычисляется так же, как для предприятия 1 выше, причём NDVI рассчитывается по данным GLASS для LAI (Leaf Area Index — индекс листовой поверхности). Это требует пересчёта R_n от суточного максимума к суточному среднему значению для часов с $H_0 > 0$. Коэффициент пересчёта рассчитан по модели AERMET и равен 1,735.

Параметр Боуэна B_{o} рассчитывается как $B_{o} = H_{0}/LE$.



Рис. 8. Карты параметров Боуэна для предприятий 1 и 2, построенные по стандартам AERSURFACE и по данным Landsat и ERA5. Чёрный цвет: >2

Наши попытки построить параметр Боуэна из данных ERA5 о потоках явного и скрытого тепла для поверхности дали значения с высокой изменчивостью и без чёткой сезонной зависимости. Поэтому за основу были взяты данные ERA5 по вертикальным атмосферным профилям. Логика расчёта по ним для предприятия 2 следующая.

Разность потенциальных температур *DT* рассчитывается для двух нижних уровней атмосферного профиля ERA5 (1000 и 975 мбар) как разность измеренных температур минус стандартная адиабата 9,8 °C/км, умноженная на среднюю разницу высот между этими уровнями, принятую за 200 м.

Параметр Боуэна рассчитывается как $B_o = \gamma \cdot DT/De$, где γ — психрометрическая постоянная; De — разница удельной влажности между двумя указанными уровнями.

Значения параметра Боуэна, превышающие 4, игнорировались как артефакты. Сезонная зависимость параметра Боуэна сглаживалась полиномом. Полученные карты параметра Боуэна сравниваются с картами, построенными по стандартам AERSURFACE, применённым к классификации землепользования на основе Landsat (*puc. 8*). *Рисунок 9* показывает, что две версии сезонной динамики параметра Боуэна, построенные по GLASS и ERA5, более или ме-



нее согласуются, несмотря на различия в данных и алгоритмах. Тем не менее оба радикально отличаются по абсолютной величине и сезонной динамике от стандартов AERSURFACE. Таким образом, ожидается, что применение данных дистанционного зондирования и реанализа существенно изменит значения параметров Боуэна, используемые AERMOD. Ниже оценивается, к каким изменениям концентраций модели это приводит.

Puc. 9. Сравнение сезонной динамики параметра Боуэна по AERSURFACE и по GLASS или ERA5 для предприятия 2



Рис. 10. Абсолютная разность между годовыми максимумами критичных загрязнителей для предприятий 1 и 2. Различия менее 0,1 уровня красного не показаны

Таблица 4. Абсолютная разность между максимальными часовыми концентрациями критичных загрязнителей, рассчитанная по стандартам AERSURFACE (STD) и по данным GLASS или ERA5 для параметра Боуэна (NonSTD)

Предприятие, тип данных	RFC _{ac} , мг∙м ⁻³	STD-LC8G RFC _{ac} DiffFirst	STD-LC8G STD DiffFirst	STD-LC8G RFC _{ac} Day95%	STD-LC8G STD Day95%			
	Среднее по регио	нам вне санитар	эно-защитной з	ОНЫ				
1	0,3	0,034	0,058	0,14	0,45			
2, GLASS	2, GLASS 0,2		0,03	0,076	0,44			
2, ERA5	0,2	0,089	0,045	0,049	0,29			
Критичный регион								
1	0,3	0,112	0,093	0,175	0,40			
2, GLASS	0,2	1	0,07	0,48	0,31			
2, ERA5	0,2	0,95	0,139	0,36	0,23			

В *табл.* 4 представлена сводка модельных концентраций для трёх описанных выше способов расчёта параметра Боуэна для двух предприятий. Использованы два критерия для измерения эффекта привлечения новых данных по параметру Боуэна: DiffFirst и Day95%. Эффект взят по абсолютному значению и показан относительно референтной (т.е. предельно допустимой) концентрации RFC_{ас} и относительно расчёта по стандартам AERSURFACE (STD). Эффект по критерию DiffLast близок к нулю, поэтому не показан. *Рисунок* 10 показывает эти результаты в виде карт. Для предприятия 1 влияние параметра Боуэна по данным Landsat сравнимо по величине с влиянием альбедо и намного слабее, чем влияние шероховатости. Для предприятия 2 влияние параметра Боуэна значительно слабее, чем даже влияние альбедо. Результаты для параметра Боуэна по GLASS и ERA5 близки, несмотря на разницу между алгоритмами и используемыми данными. Это говорит в пользу достоверности параметра Боуэна, полученного из данных реанализа. Слабое влияние параметра Боуэна на максимальные концентрации обусловлено тем же фактором, что и для альбедо: максимальные разовые концентрации имеют место в основном для $H_0 < 0$, в то время как наибольшее влияние данных для параметра Боуэна имеет место для $H_0 > 0$, так что оно почти не влияет на пики концентрации. Эффекты по критериям Day95% и DiffFirst более значимы. На рисунке, как и выше, применяется цветовое кодирование «радуга».

Заключение

Выводы в литературе о влиянии на модельные концентрации трёх параметров поверхности, используемых AERMOD (альбедо, шероховатость и коэффициент Боуэна), были сделаны в основном по исследованиям изолированных источников. Настоящая работа развивает эти выводы для реальных промышленных комплексов с несколькими источниками. Используются три критерия для измерения эффекта привлечения дистанционных наблюдений сравнительно со стандартными параметрами AERSURFACE.

Первый критерий — «абсолютный максимум»: разница между годовыми максимумами часовых концентраций. Он в основном и используется при принятии регуляторных решений. Второй критерий, «регуляторный», предполагает, что выброс загрязняющих веществ происходит только в течение дневных рабочих часов (08:00—17:00) и что регуляторные меры основаны на 95%-х квантилях распределения концентраций, а не на абсолютных максимумах. Этот критерий несколько подавляет доминирующую роль ночных концентраций в устойчивой атмосфере. Третий критерий, «мгновенный», учитывает годовые максимумы почасовых различий, т. е. наибольший за год часовой эффект привлечения дистанционных данных. Хотя данный критерий актуален для целей регулирования, он может быть полезен для исследований и уточнения моделей.

Таблица 5. Сводка различных мер эффекта привлечения космических наблюдений для моделирова-
ния максимальных разовых концентраций критичных загрязнителей по совокупности рассмотрен-
ных предприятий. Коды: «!» — сильный эффект, «+» — существенный эффект, «~» — слабый эффект,
«—» — пренебрежимо малый эффект

		Вся окрестность предприятия			Критичный район для предприятия				
Mepa	Критерий	Класси- фикация	Шерохо- ватость	Альбедо	Параметр Боуэна	Класси- фикация	Шерохо- ватость	Альбедо	Параметр Боуэна
Острый риск (/RFC _{ac})	Абсолютный	!	~	—	—	!	~	~	—
	Регуляторный	_	_	—	~	~	~	~	+
	Мгновенный	!	+	+	~	!	!	!	+
Относи- тельное воздейст- вие (/STD)	Абсолютный	+	~	—	_	+	~	~	_
	Регуляторный	+	+	~	+	+	+	~	+
	Мгновенный	+	+	+	—	+	+	+	~

В *табл. 5* приведена сводка полученных в настоящей работе результатов по эффекту привлечения космических данных к моделированию рассеяния индустриальных загрязнений. Эффект измеряется по трём вышеуказанным критериям и двумя мерами: по отношению к референтным концентрациям RFC_{ас}, понимаемым как допустимые пределы (это, по существу, индекс острого риска), и в «относительных» единицах — по отношению к концентрациям, полученным без использования космических данных по стандартным параметрам AERMOD. Сильным эффектом считались значения более 1 хотя бы для одного предприятия, существенным — значения в диапазоне (0,4–0,5)...1, слабым — значения в диапазоне (0,1...0,4)–0,5, пренебрежимо малым — значения менее 0,1 для всех рассмотренных предприятий.

Таким образом, по «абсолютному» критерию привлечение дистанционных данных вместо стандартов AERMOD обоснованно на всей окрестности предприятий для шероховатости и классификации землепользования и только в критичном районе — для альбедо. По «регуляторному» критерию и мере острого риска это обоснованно для параметра Боуэна на всей окрестности и для всех параметров — в критичном районе, а по «относительной» мере — для всех параметров на всей окрестности. По «мгновенному» критерию привлечение дистанционных данных обоснованно для параметра Боуэна только в критичном районе, а для остальных параметров — на всей окрестности.

Частью настоящего исследования было также сравнение пространственной структуры и сезонной динамики параметров поверхности по космическим данным и по стандартам AERMOD. Для шероховатости значения для застроенных территорий и лесов построены на основе ALOS DEM и не имеют сезонной динамики (она накладывается на них в соответствии со стандартами AERSURFACE). Значения для другой растительности рассчитываются по NDVI и более или менее согласуются со стандартами AERMOD летом и осенью, но не зимой и весной. Для параметра Боуэна сезонная динамика, построенная по совершенно разным данным (вертикальные профили параметров атмосферы ERA5 и поверхностные тепловые потоки GLASS), имеет сходную форму (хотя и разные значения), что подтверждает её реальность. Это радикально отличается от стандартной сезонной динамики AERMOD.

Для рассмотренных предприятий, как и для большинства реальных предприятий, не проводится систематический мониторинг создаваемых ими концентраций загрязнителей, поэтому невозможно доказать, что концентрации, рассчитанные по дистанционным данным, более соответствуют реальности, чем концентрации, рассчитанные на основе стандартов AERMOD. Однако это представляется правдоподобным предположением.

Настоящее исследование — вклад в методику неизбежной в будущем ассимиляции данных дистанционного зондирования в модели рассеяния индустриальных загрязнений.

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. № 5. С. 49–56.
- 2. Балтер Б. М., Балтер Д. Б., Егоров В. В., Стальная М. В., Фаминская М. В. Данные космических наблюдений параметров поверхности в модели рассеяния индустриальных загрязнений воздуха AERMOD. Часть 1. Обзор, данные, классификация землепользования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 97–111. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-97-111.
- 3. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Р 2.1.10.1920-04. Роспотребнадзор. М., 2004. 144 с.
- 4. *Bastiaanssen W., Roebeling R.A.* Analysis of Land Surface Exchange Processes in Two Agricultural Regions in Spain Using Thematic Mapper Simulator Data // Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales: Proc. Yokohama Symp. July 1993. IAHS Publ., 1993. V. 212. P. 407–416.
- 5. *Bastiaanssen W., Menenti M., Feddes R.A., Holtslag A.A.M.* (1998a) A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation // J. Hydrology. 1998. V. 212–213. P. 198–212.
- Bastiaanssen W., Pelgrum H., Wang J., Ma Y., Moreno J., Roerink G.J., van der Wal T. (1998b) A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation // J. Hydrology. 1998. V. 212– 213. P. 212–229.
- 7. *Gupta R., Prasad T.S., Vijayan D.* Estimation of Roughness Length and Sensible Heat Flux from WiFS and NOAA AVHRR Data // Advances in Space Research. 2002. V. 29(1). P. 33–38.
- 8. Hersbach H., Dee D. ERA5 reanalysis is in production // ECMWF Newsletter. 2016. No. 147(7). P. 5–6.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Horányi A., Sabater J. M., Nicolas J., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D. Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5 // ECMWF Newsletter. 2019. No. 159. P. 17–24.

- 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.
- Kent C., Grimmond S., Gatey D., Hirano K. Urban Morphology Parameters from Global Digital Elevation Models: Implications for Aerodynamic Roughness and for Wind-speed Estimation // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 221. P. 316–339.
- 12. *Liang S., Zhang X., Xiao Z., Cheng J., Liu Q., Zhao X.* Global LAnd Surface Satellite (GLASS) Products. Algorithms, Validation and Analysis. Springer, 2014.
- 13. *Liang S., Wang D., He T., Yu Y.* Remote Sensing of Earth's Energy Budget: Synthesis and Review // Intern. J. Digital Earth. 2019. V. 12(7) P. 737–780. DOI: 10.1080/17538947.2019.1597189.
- 14. Simpson M., Jasinski M.F., Borak J., Blonski S., Spruce J., Walker H., Delle Monache L. Integrating NASA Earth Science Capabilities into the Interagency Modeling and Atmospheric Assessment Center for Improvements in Atmospheric Transport and Dispersion Modeling. LLNL-TR-596732 / Lawrence Livermore National Laboratory. 2012. 53 p.

Space observations of surface parameters and reanalysis data for AERMOD modeling of industrial air pollution. Part 2. Albedo, surface roughness and Bowen parameter

B. M. Balter¹, **D. B. Balter**¹, **V. V. Egorov**¹, **M. V. Stalnaya**¹, **M. V. Faminskaya**²

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

We try to enhance the AERMOD industrial pollution dispersion model with remote sensing observations and climatic models based on them. In this paper, the focus is on three surface parameters (albedo, roughness and Bowen ratio). Roughness and albedo are reconstructed directly from remote observations, and Bowen parameter requires the thermal flux estimates from climatic models. We model maximum hourly concentrations and the resulting acute health risk and assess the effect on them produced by using remote sensing data for local areas around industrial plants instead of global standard AERMOD parameters. We consider three real multi-source industries for the effect of classification and two of them for the effect of surface parameters. The effect on the 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 relative measure of impact. For a), the impact of roughness dominates, and that of albedo and Bowen ratio is small. For b), the impact of roughness is less prominent, and that of albedo and Bowen ratio is noticeable. For c), the impact is considerable for all three parameters. We provide the figures for different measures of remote sensing data effect and discuss the perspective of using remote sensing data in regulatory context.

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

Accepted: 10.12.2020 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-121-137

References

1. Balter B. M., Balter D. B., Egorov V. V., Stalnaya M. V., Faminskaya M. V., Landsat land use classification for assessing health risk from industrial air pollution, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 5, pp. 49–56 (in Russian).

- Balter B. M., Balter D. B., Egorov V. V., Stalnaya M. V., Faminskaya M. V., Space observations of surface parameters for AERMOD modeling of industrial air pollution. Part 1. Literature review, data, land use classification, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 97–111 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-97-111.
- 3. Human Health Risk Assessment from Environmental Chemicals, Rospotrebnadzor Guidelines, No. 2.1.10.1920-04, Moscow, 2004, 144 p. (in Russian).
- 4. Bastiaanssen W., Roebeling R.A., Analysis of Land Surface Exchange Processes in Two Agricultural Regions in Spain Using Thematic Mapper Simulator Data, *Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales: Proc. Yokohama Symp.*, July 1993, IAHS Publ., 1993, Vol. 212, pp. 407–416.
- 5. Bastiaanssen W., Menenti M., Feddes R.A., Holtslag A.A.M. (1998a), A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation, *J. Hydrology*, 1998, Vol. 212–213, pp. 198–212.
- Bastiaanssen W., Pelgrum H., Wang J., Ma Y., Moreno J., Roerink G. J., van der Wal T. (1998b), A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation, *J. Hydrology*, 1998, Vol. 212– 213, pp. 212–229.
- 7. Gupta R., Prasad T.S., Vijayan D., Estimation of Roughness Length and Sensible Heat Flux from WiFS and NOAA AVHRR Data, *Advances in Space Research*, 2002, Vol. 29(1), pp. 33–38.
- 8. Hersbach H., Dee D., ERA5 reanalysis is in production, ECMWF Newsletter, 2016, No. 147(7), pp. 5–6.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Horányi A., Sabater J. M., Nicolas J., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5, *ECMWF Newsletter*, 2019, No. 159, pp. 17–24.
- 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.
- 11. Kent C., Grimmond S., Gatey D., Hirano K., Urban Morphology Parameters from Global Digital Elevation Models: Implications for Aerodynamic Roughness and for Wind-speed Estimation, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 221, pp. 316–339.
- 12. Liang S., Zhang X., Xiao Z., Cheng J., Liu Q., Zhao X., *Global LAnd Surface Satellite (GLASS) Products. Algorithms, Validation and Analysis*, Springer, 2014.
- 13. Liang S., Wang D., He T., Yu Y., Remote Sensing of Earth's Energy Budget: Synthesis and Review, *Intern. J. Digital Earth*, 2019, Vol. 12(7), pp. 737–780, DOI: 10.1080/17538947.2019.1597189.
- Simpson M., Jasinski M. F., Borak J., Blonski S., Spruce J., Walker H., Delle Monache L., Integrating NASA Earth Science Capabilities into the Interagency Modeling and Atmospheric Assessment Center for Improvements in Atmospheric Transport and Dispersion Modeling, LLNL-TR-596732, Lawrence Livermore National Laboratory, 2012, 53 p.