

Космические наблюдения и реанализ глобальных климатических данных в пакете моделирования AERMOD для повышения качества оценки промышленного загрязнения воздуха и рисков для здоровья

Б.М.Балтер, Д.Б.Балтер, В.В.Егоров, М.В.Стальная (ИКИ),
М.В.Фаминская (РГСУ)

В работе мы проводим дополнение модели рассеивания промышленных загрязнений AERMOD с помощью дистанционного зондирования и климатических моделей на их основе.

Рассматриваются три параметра, влияющие на рассеяние загрязнений:

- альбедо,
- шероховатость поверхности,
- коэффициент Боуэна;

а также классификация землепользования, от которой зависят эти параметры.

Моделирование острого риска для здоровья

Моделируются максимальные почасовые концентрации и возникающий в результате острый риск для здоровья.

Проводится оценка влияния на них рассматриваемых параметров, используя данные дистанционного зондирования для локальных территорий вокруг промышленных предприятий вместо глобальных стандартных параметров AERMOD.

Исследование проводится для пяти различных промышленных предприятий, с особым акцентом на два: коксохимический завод под Москвой и очистная станция на юге России.

Цель исследования состоит в том, чтобы использовать космические данные в нормативном контексте, например, при создании санитарно-защитных зон (СЗЗ).

Используемые космические данные

Рассматриваются как прямые космические наблюдения, так и имеющиеся в свободном доступе результаты их реанализа для определения тепловых потоков.

Альbedo и шероховатость поверхности оцениваются по дистанционным наблюдениям, коэффициент Боуэна – по косвенным оценкам тепловых потоков или с использованием включающих их климатических моделей.

Наше исследование ограничено тем, что мы не вмешиваемся в микрометеорологическую модель AERMET, встроенную в AERMOD, и вводим новые данные только по стандартным каналам, предоставляемым AERMOD.

Показано, какие типы космических данных, которые мы считаем наиболее перспективными, можно использовать в AERMOD, и в какой степени их использование изменяет моделируемые концентрации загрязняющих веществ, наиболее важные для здоровья человека.

Использование космических данных в AERMOD. Подход 1.

Использование космических данных встроено в AERMOD поскольку его процессор параметров поверхности AERSURFACE опирается на готовую классификацию NLCD-92 территории США на основе данных ИСЗ Landsat по 21 категории землепользования (стандарты AERSURFACE), применимость которых за пределами США вызывает сомнения.

В этих случаях можно пытаться расширить или дополнить подход «Landsat+AERSURFACE» с использованием других типов данных.

Подход 1: создать совместимую с NLCD-92 классификацию землепользования и затем использовать стандарты AERSURFACE

Показано, что наиболее правдоподобные результаты получаются при классификация данных Landsat на основе локальных обучающих участков. Это показано для пяти предприятий, каждое из которых представляет определенный тип индустрии.

Использование космических данных в AERMOD. Подход 2.

Подход 2 : непосредственно оценить параметры поверхности, требуемые для AERMOD (альbedo, параметр Боуэна и шероховатость).

Широкополосное альbedo оценивается в ламбертовском приближении по данным Landsat и MODIS.

Для лугов, сельскохозяйственных культур и т. д. малая шероховатость ($< \sim 1$ м) оценивается по моделям, основанным на оптическом наблюдении параметров растительности NDVI, большая - с помощью оптической стереоскопии ALOS.

Добавляются два новых подхода. Один основан на скачке наблюдаемой высоты на границе леса, другой - на вариациях высоты в населенных пунктах, откалиброванных по данным OSM (OpenStreetMap) на репрезентативных участках.

Прямая оценка параметра Боуэна B_0 по космическим наблюдениям невозможна.

Использование космических данных в AERMOD. Подход 3.

Подход 3: интегрировать параметры атмосферы, предоставляемые существующими глобальными климатическими моделями, в рабочий процесс AERMOD.

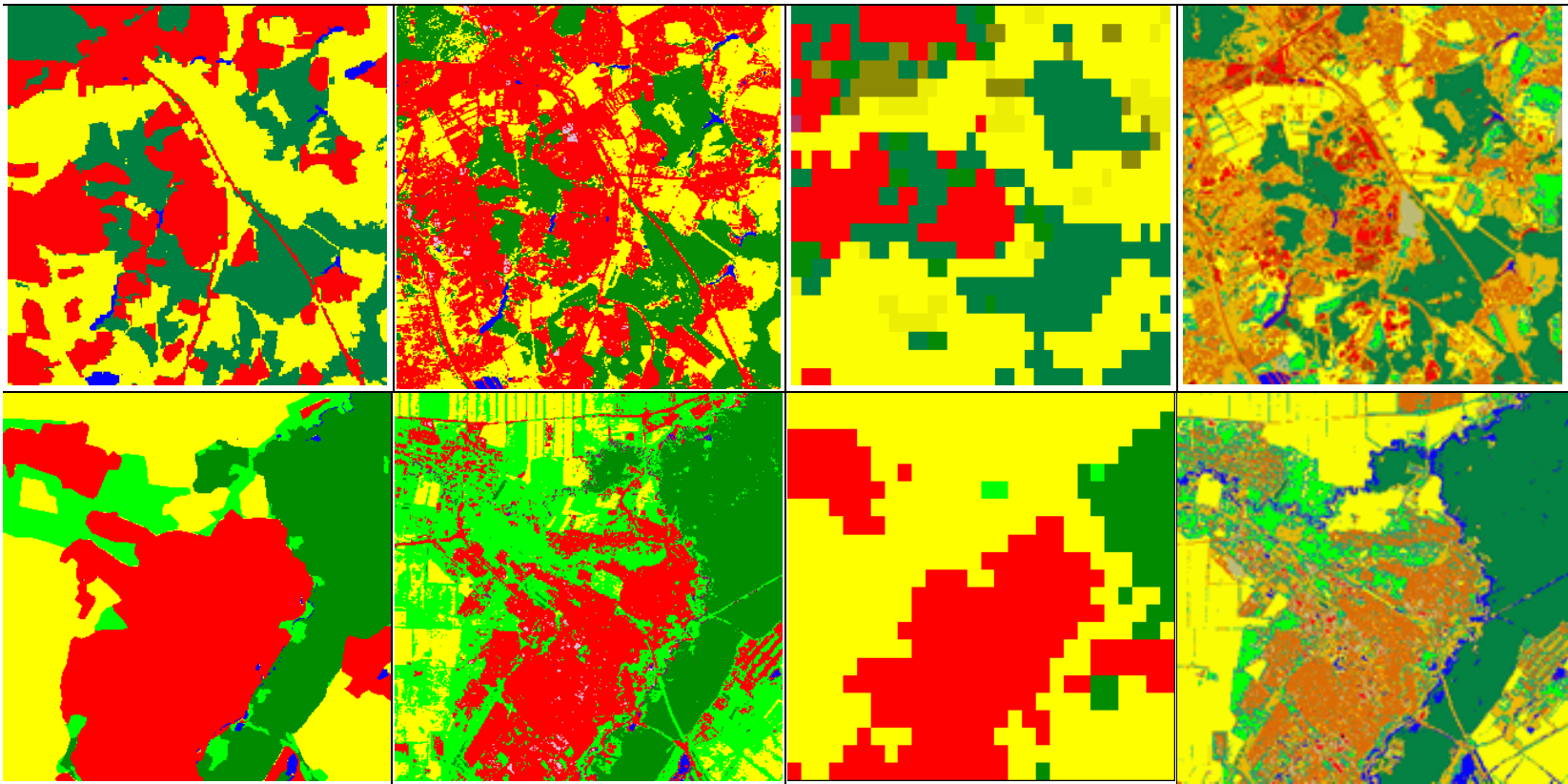
Получение параметра Боуэна из космических наблюдений требует создания модели теплового потока между атмосферой и поверхностью.

Для этого следует опираться на данные реанализа (базы GLASS, ERA5), интегрированного в климатические модели.

В работе рассматриваются два разных источника информации о параметре Боуэна:

- модели поверхностного теплового баланса,
- модели вертикального атмосферного профиля.

Сравнение классификаций землепользования

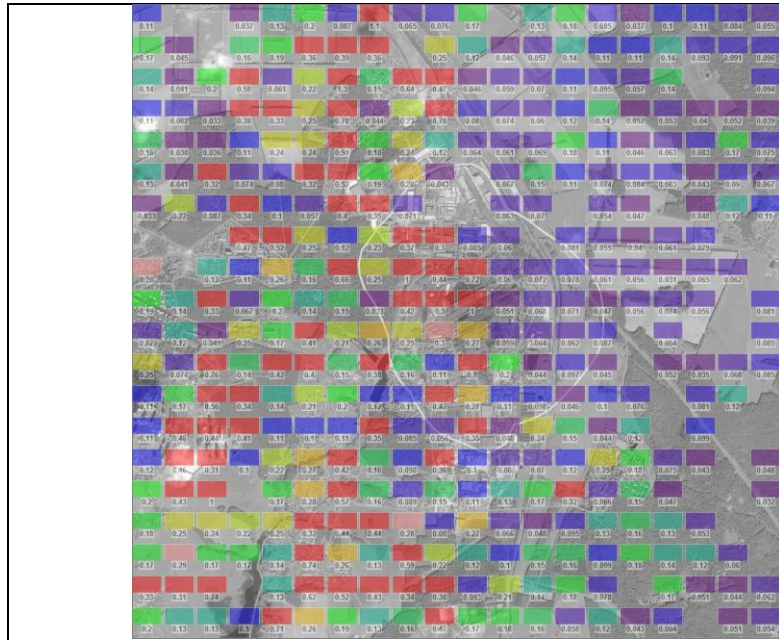


Сравнение готовых глобальных классификаций землепользования GLC30, GLC10 и MOD12Q1 и классификации с обучением по локальным тестовым участкам.

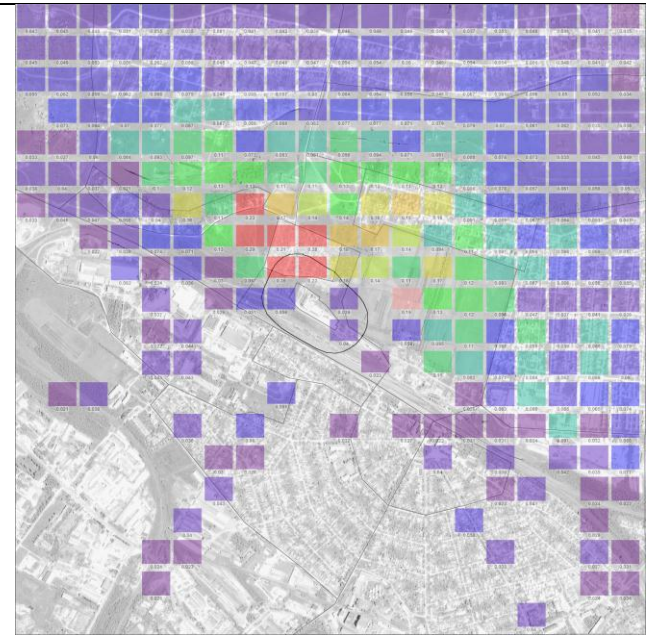
Красный: индустрия для локальных данных и любая застройка для глобальных данных, темно-зеленый: смешанный лес, желтый: зерновые культуры, синий: вода, светло-коричневый: жилой район низкой плотности для локальных данных, темно-коричневый: жилой район высокой плотности для локальных данных, зеленый: луга, серый: голая почва.

Верхний ряд: предприятие 1-коксохимический завод под Москвой , нижний ряд: предприятие 2 -очистная станция на юге России .

Влияние классификации землепользования на годовые концентрации критических загрязнителей



Предприятие 1



Предприятие 2

Абсолютная разница между годовыми максимумами критических загрязнителей, рассчитанными по GLC10 и по классификации на основе Landsat. Красный $> RFC_{ac}$, различия менее $0.1 RFC_{ac}$ не показаны. RFC_{ac} – референтная концентрация загрязнителя. Здесь и далее используется схема цветового кодирования «радуга», в которой указываем уровень, превышение которого показано красным цветом. 10% этого уровня отображается фиолетовым цветом, а значения ниже 10% не окрашены.

Эффект от использования космических данных для классификации землепользования важен – сопоставим с референтной концентрацией RFC_{ac} , являющейся порогом допустимости.

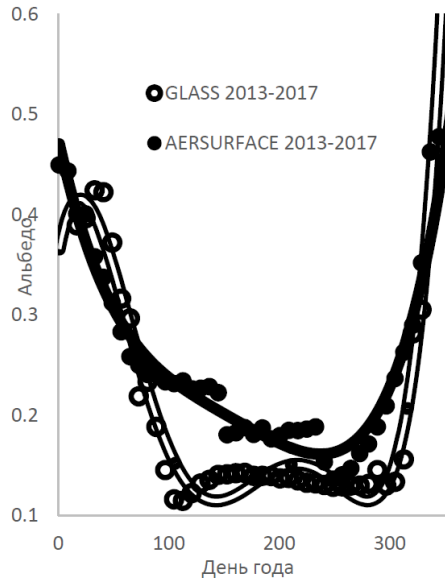
Влияние классификации землепользования на максимальные почасовые концентрации критических загрязнителей

Разница максимальных почасовых концентраций, полученных с помощью глобальных (Standard) и локальных (Landsat) карт землепользования, по отношению к RFC_{ac} для критического загрязнителя. Интегральная мера различия по всем предприятиям показана как стандартное отклонение различий.

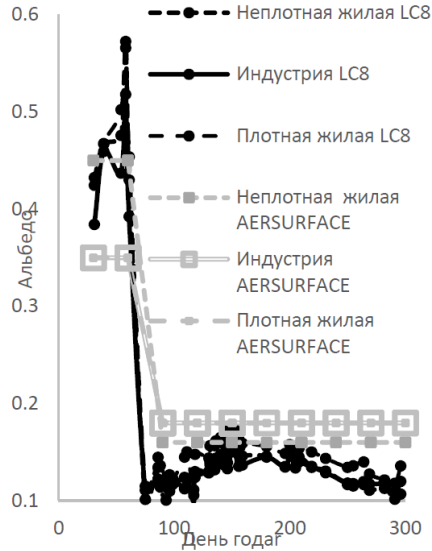
Предприятие	Загрязнитель	RFC_{ac} мг/м ³	(Landsat-Standard) / RFC_{ac}
Среднее значение по расчетной территории			
1	Коксовая пыль	0.3	0.226
2	NO ₂	0.2	-0.717
3	Железомарганцевая пыль	0.3	-0.231
4	C1-C5	9	0.014
5	Древесная пыль	0.1	-0.730
			Ср.кв.откл=0.47
В критическом жилом районе			
1	Коксовая пыль	0.3	0.36
2	NO ₂	0.2	-1.66
3	Железомарганцевая пыль	0.3	-0.66
4	C1-C5	9	-0.2
5	Древесная пыль	0.1	-0.18
			Ср.кв.откл =0.82

Сравнение сезонной динамики альбедо

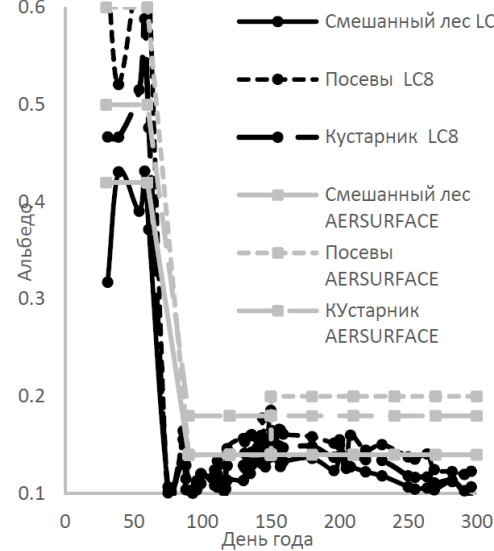
Среднее 10 x 10 км 8 дней



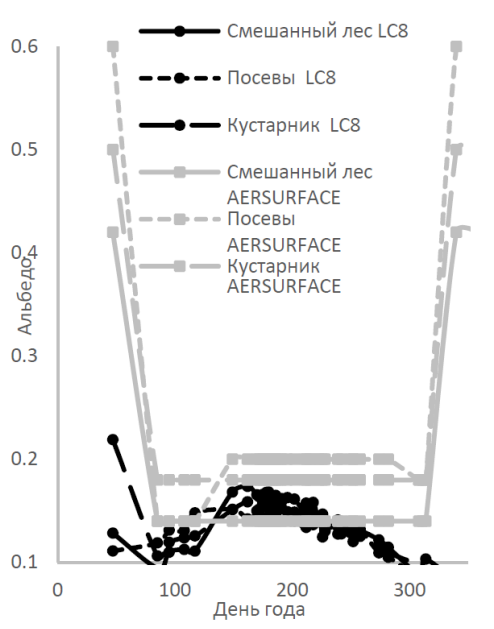
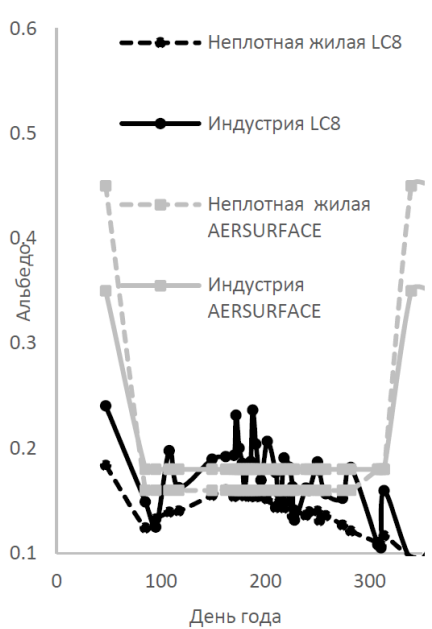
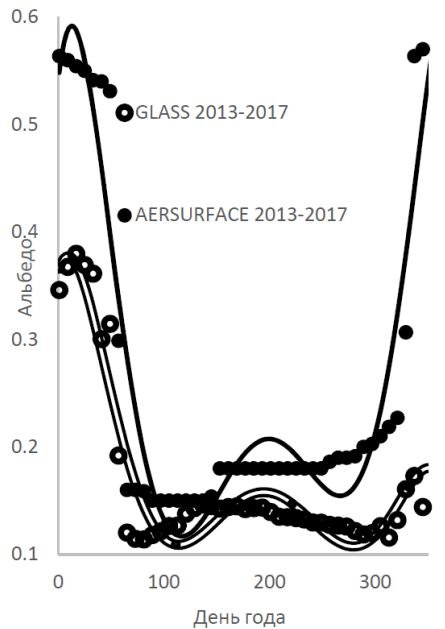
Застройка, даты LC8



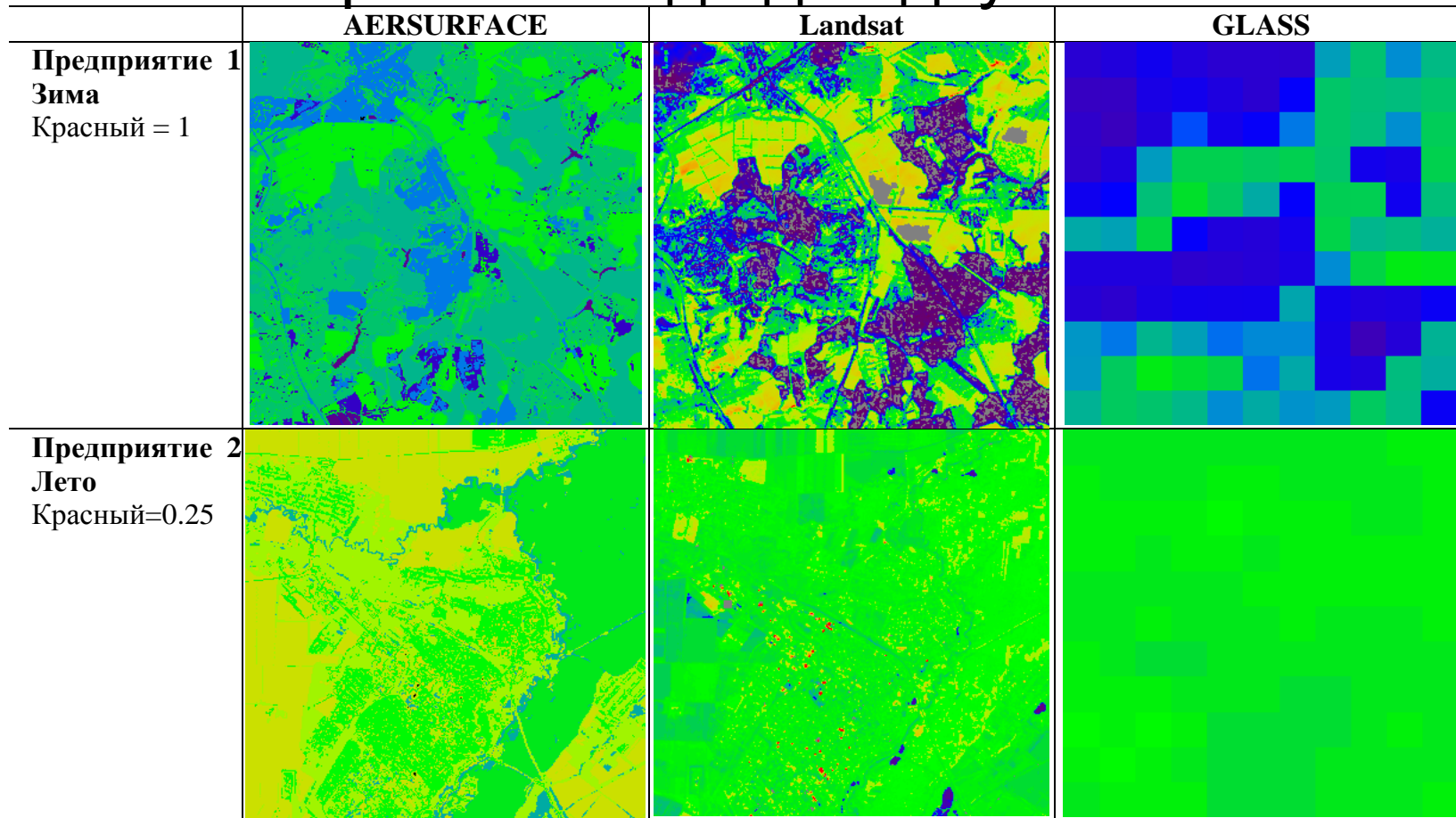
Растительность, даты LC8



Альбедо по данным GLASS и Landsat в сравнении со стандартами AERSURFACE. Вверху: предприятие 1, внизу: предприятие 2. Для всей территории 10 x 10 км приведены точки, усредненные по 8-дневным интервалам и по годам 2013-2017 г. и интерполяция их сезонной динамики полиномиальной регрессией 4 порядка. Для данных Landsat LC8 приведены точки по дням года, соответствующие датам съемки за 2017 – 2019 г.



Карты альбедедо для двух сезонов



Альбедедо по стандартам AERSURFACE, Landsat и GLASS.

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 альбедедо по GLASS, Landsat, сопоставимая с разницей между этими оценками и стандартами AERSURFACE. Для предприятия 2 оценки альбедедо по GLASS и Landsat сопоставимы и существенно отличаются от стандартов AERSURFACE.

Оценка влияния использования космических данных и реанализа на концентрации

Оценка влияния использования космических данных и реанализа проводилась по трем критериям.

а) «Абсолютный» критерий: как разница между годовыми максимумами часовых концентраций критического загрязнителя - мера DiffLast;

б) «Регуляторный» критерий: то же самое, ограниченное дневной продолжительностью рабочего времени и 95% квантилем вместо абсолютного максимума - мера Day95%;

в) «Мгновенный» критерий: как максимальная почасовая разница за год - мера DiffFirst.

Мера воздействия делится

- либо на контрольную концентрацию загрязнителя, которая дает влияние на риск для здоровья,
- либо на концентрацию, полученную с помощью стандартов AERMOD, которая дает относительную меру воздействия.

Влияние стандартов альbedo на максимальные почасовые концентрации критических загрязнителей

Абсолютные разности между максимальными часовыми концентрациями критических загрязнителей, рассчитанными по стандартам AERSURFACE (STD) и по данным Landsat 8 или GLASS для альbedo (LC8G).

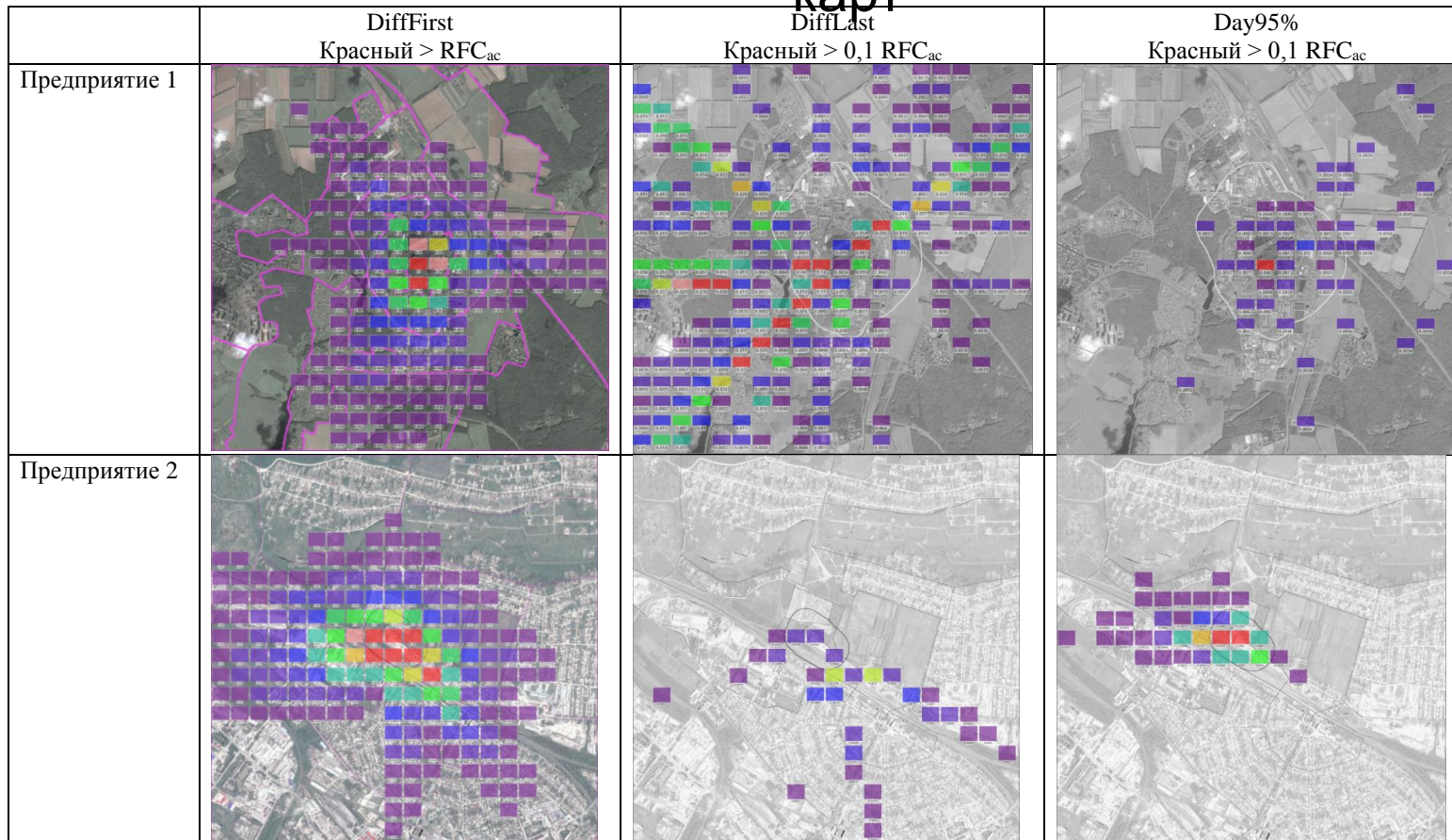
Предприятие	RFC _{ac} мг/м ³	STD-LC8G / RFC _{ac} DiffFirst	STD-LC8G / STD DiffFirst	STD-LC8G / RFC _{ac} DiffLast	STD-LC8G / STD DiffLast	STD- LC8G / RFC _{ac} Day95%	STD-LC8G / STD Day95%
Среднее по районам вне СЗЗ							
1*	0.3	0.15	0.11	0.035	0.02	0.0013	0.15
2*	0.2	0.56	0.55	0.009	0.008	0.027	0.17
3**	0.3	0.21	0.15	0.028	0.02	0.0084	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

в большинстве случаев, когда применяется критерий DiffLast, эффект привлечения данных дистанционного зондирования альbedo 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 является критерий Day95%.

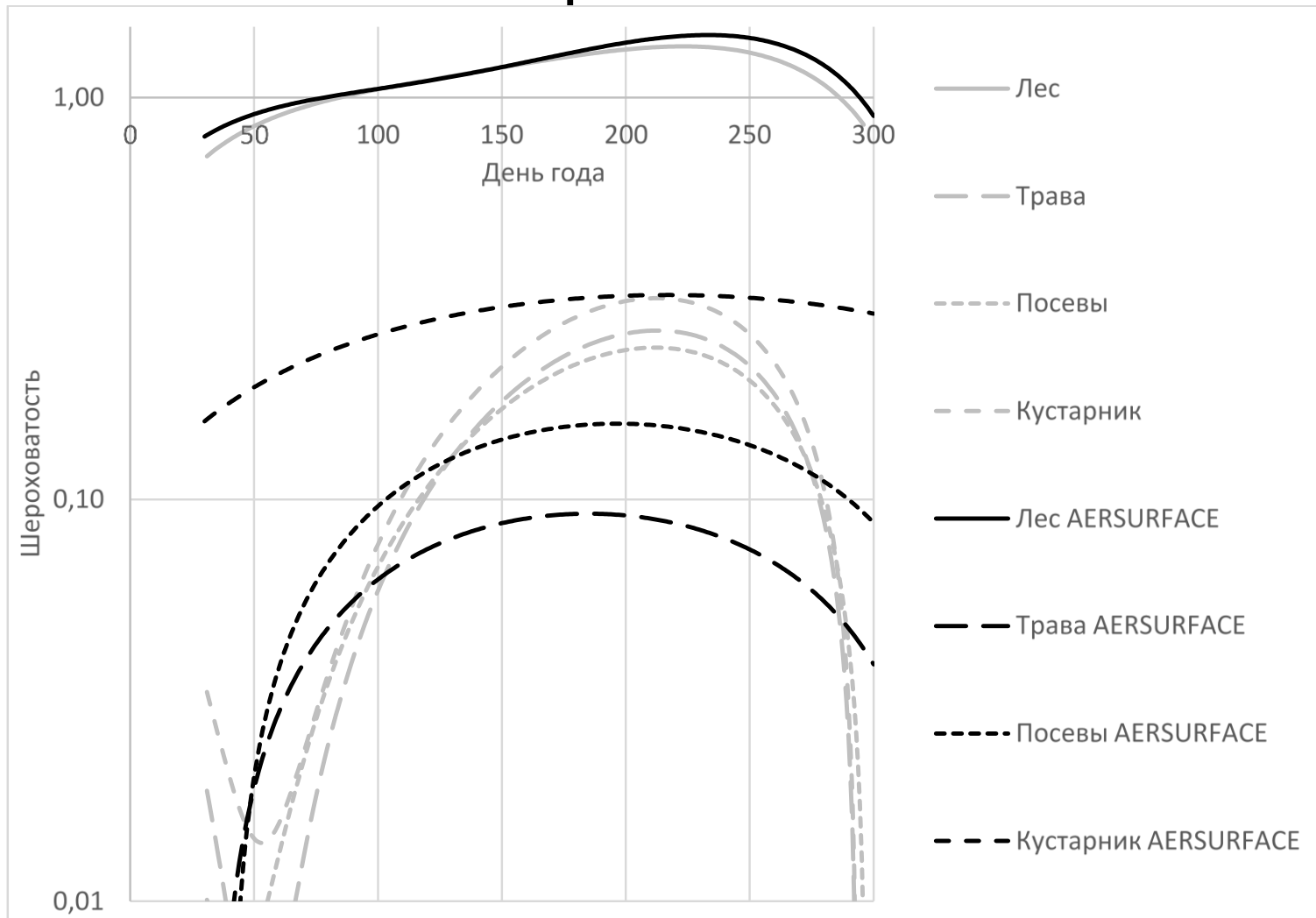
Сравнение способов оценки альбедо по космическим данным на годовые максимумы концентрации в виде карт



Абсолютная разница между годовыми максимумами критических загрязнителей для предприятия 1 и предприятия 2. Различия менее 0,1 уровня красного не показаны.


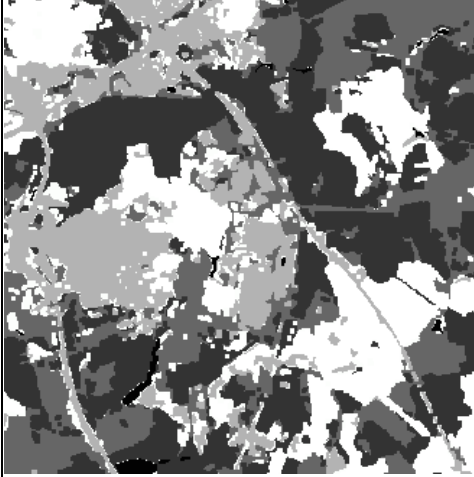

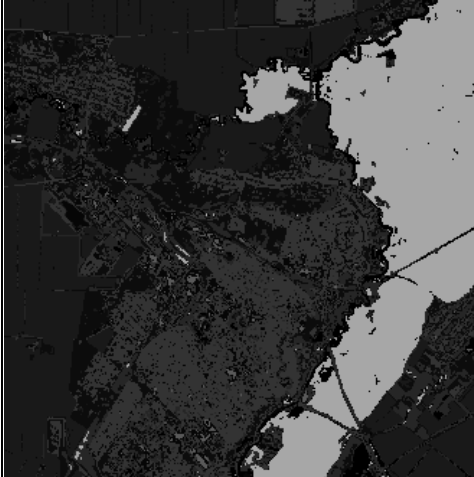
Пространственное распределение эффекта использования дистанционных данных для альбедо зависит от типа предприятия, территории и применяемых критериев.

Сравнение сезонной динамики шероховатости



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

Сравнение карт шероховатости

	Landsat NDVI+ALOS для лета	Стандарты AERSURFACE для лета
Предприятие 1. Черный = 0 м, белый > 1 м		
Предприятие 2. Черный = 0 м, белый > 2 м		

Полные карты шероховатости для предприятия 1 и предприятия 2: слева - построенные по Landsat NDVI для нелесной растительности и ALOS DEM для леса и зданий, справа – построенные по классификации Landsat со стандартами AERSURFACE

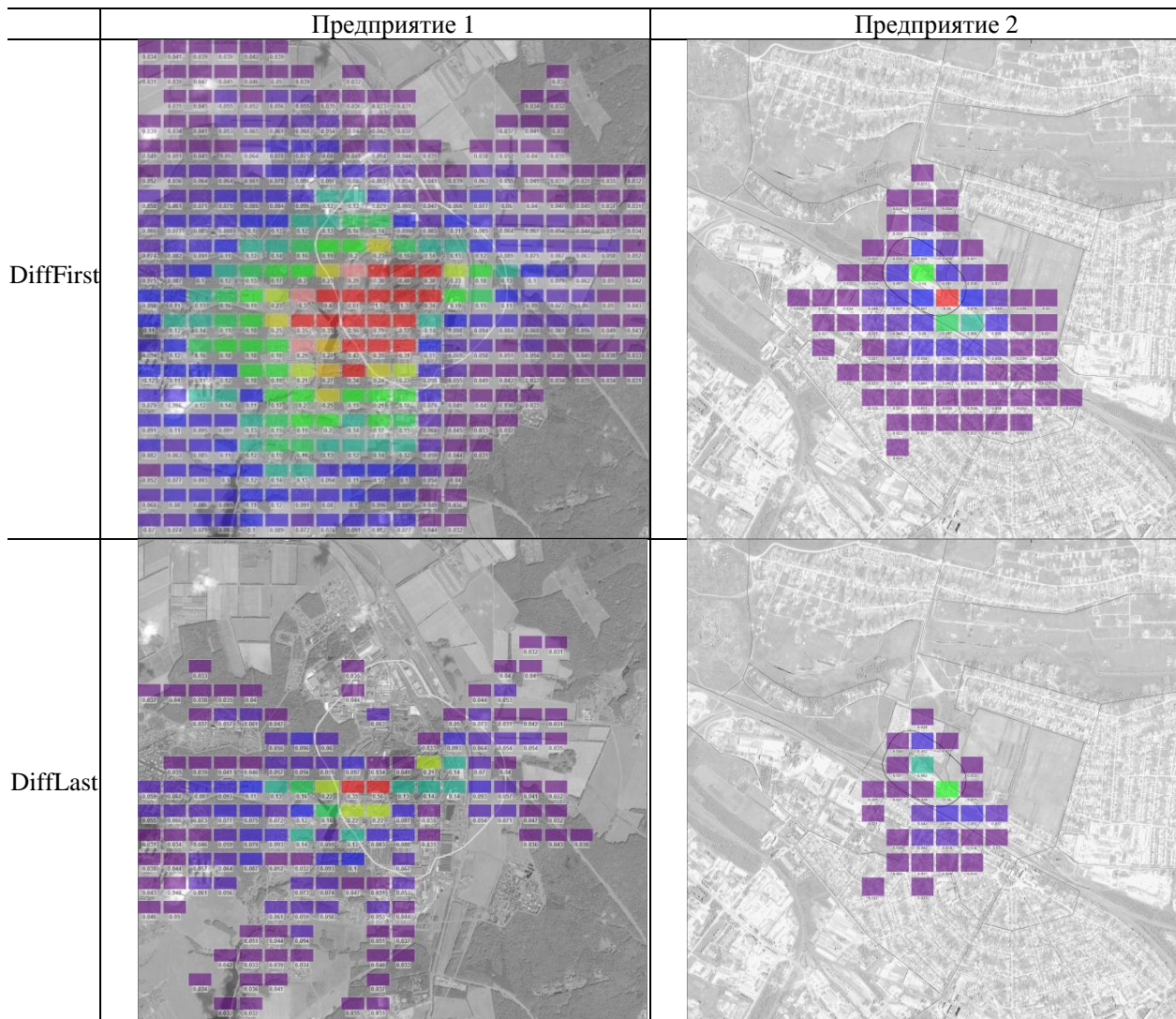
Влияние стандартов шероховатости на максимальные почасовые концентрации критических загрязнителей

Абсолютные разности между максимальными часовыми концентрациями критических загрязнителей, рассчитанными по стандартам AERSURFACE (STD) и по данным Landsat 8 + ALOS DEM (LC8) для шероховатости.

Предприятие	RFC _{ac} мг/м ³	STD-LC8 / RFC _{ac} DiffFirst	STD-LC8 / STD DiffFirst	STD-LC8 / RFC _{ac} DiffLast	STD-LC8 / STD DiffLast	STD-LC8 / RFC _{ac} Day95%	STD-LC8 / STD Day95%
Среднее по регионам вне СЗЗ							
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

Влияние шероховатости сравнимо с влиянием альбедо, если их измерять с помощью DiffFirst. Если измерять по 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, как днем, так и ночью. Другое следствие этого – то, что 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.

Сравнение способов влияния оценки шероховатости по космическим данным на годовые максимумы концентрации в виде карт



Абсолютная разность между годовыми максимумами критических загрязнителей для предприятия 1 и предприятия 2. Красный $\geq RFC_{ac}$, различия менее 0,1 RFC_{ac} не показаны

И в DiffFirst, и в DiffLast существует значительная территория, где эффект данных Landsat+ALOS для шероховатости значим ($> 0,1 RFC_{ac}$). Это контрастирует с ситуацией для альbedo, где нет значимых эффектов вне санитарно-защитной зоны (СЗЗ).

Расчет параметра Боуэна по данным реанализа

Способ 1. Использование модели поверхностного теплового баланса.

Включает в себя данные ИСЗ Landsat и/или данные реанализа GLASS, данные с местных метеорологических станций и некоторые полуэмпирические формулы.

Способ 2. Использование модели вертикального атмосферного профиля.

Включает в себя данные реанализа из ERA5 по вертикальным атмосферным профилям и имеет промежуточное пространственное разрешение ($0,125^\circ$), более или менее соответствующее размеру области 10 км x 10 км, характеризующейся параметром Боуэна в AERMOD.

Влияние моделей расчета параметра Боуэна на максимальные почасовые концентрации критических загрязнителей

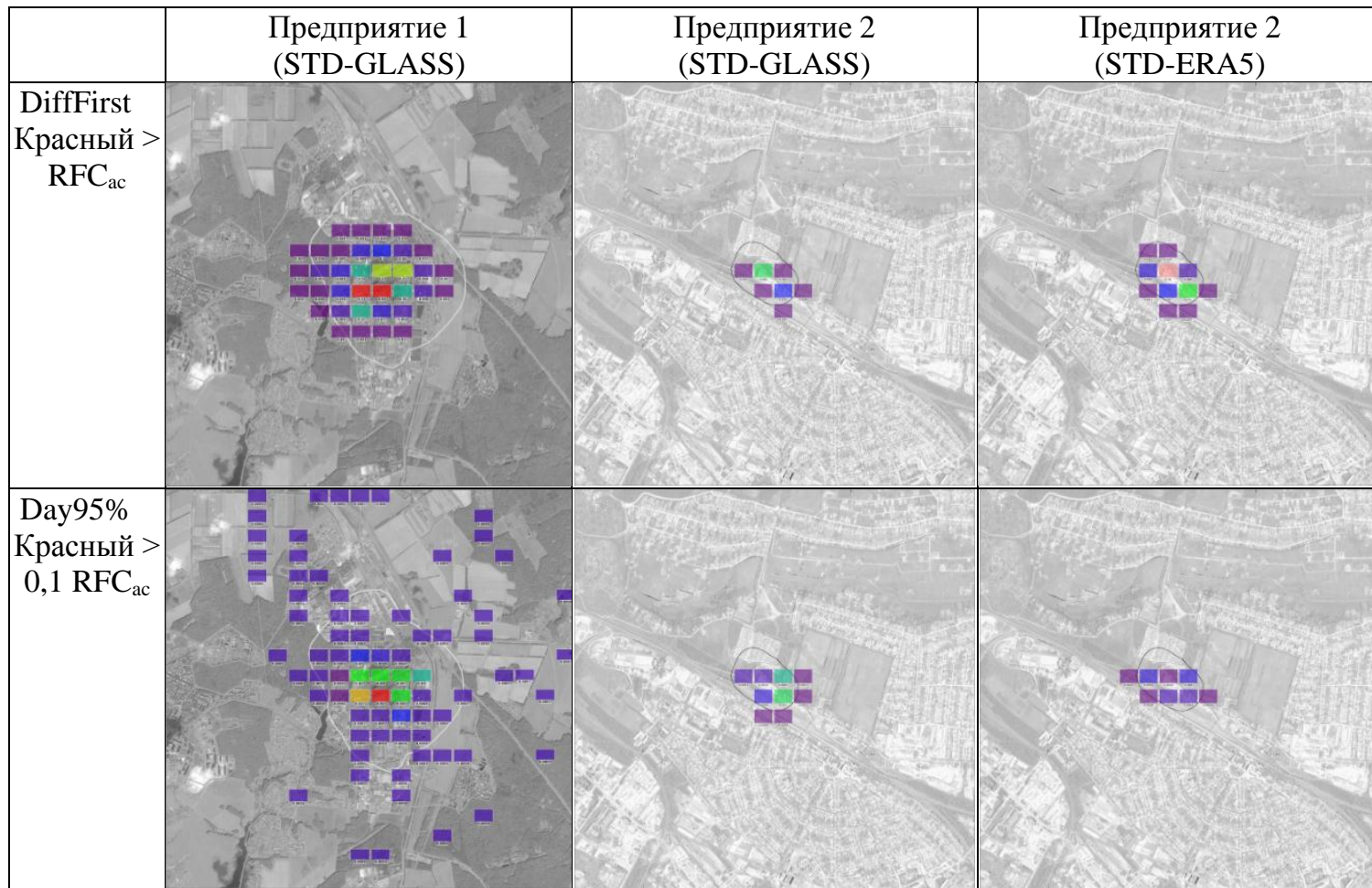
Абсолютные разности между максимальными часовыми концентрациями критичных загрязнителей, рассчитанными по стандартам AERSURFACE (STD) и по данным GLASS или ERA5 для параметра Боуэна (NonSTD)

Предприятие и тип данных	RFC _{ac} мг/м ³	(STD-NonSTD) / RFC _{ac} DiffFirst	(STD-NonSTD) / STD DiffFirst	(STD-NonSTD) / RFC _{ac} Day95%	(STD-NonSTD) / STD Day95%
Среднее по регионам вне СЗЗ					
1	0.3	0.034	0.058	0.14	0.45
2 GLASS	0.2	0.1	0.03	0.076	0.44
2 ERA5	0.2	0.089	0.045	0.049	0.29
Критичных 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

Использованы два критерия для измерения эффекта привлечения новых данных по параметру Боуэна: DiffFirst и Day95%. Эффект по критерию DiffLast близок к нулю, поэтому не показан.

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.

Сравнение способов влияния оценки параметра Боуэна по результатам реанализа на годовые максимумы загрязнителей в виде карт



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

Выводы

По использованию трех критериев для измерения эффекта притяжения дистанционных наблюдений сравнительно со стандартными параметрами AERSURFACE.

Сводка различных мер эффекта притяжения космических наблюдений для моделирования максимальных разовых концентраций критичных загрязнителей. По совокупности рассмотренных предприятий. Коды: ! – сильный эффект, + - существенный эффект, ~ - слабый эффект, – - пренебрежимо малый эффект.

Мера	Критерий	Вся окрестность для предприятия				Критичный район для предприятия			
		Классиф.	Шероховат.	Альбедо	Боуэн	Классиф.	Шероховат.	Альбедо	Боуэн
Острый риск (/RFC _{ac})	Абсолютный	!	~	–	–	!	~	~	–
	Регуляторный	–	–	–	~	~	~	~	+
	Мгновенный	!	+	+	~	!	!	!	+
Относит. воздействие (/STD)	Абсолютный	+	~	–	–	+	~	~	–
	Регуляторный	+	+	~	+	+	+	~	+
	Мгновенный	+	+	+	–	+	+	+	~

Выводы

Изучение влияния космической классификации землепользования на концентрацию загрязняющих веществ для пяти предприятий различных отраслей позволило сделать вывод о том, 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. Это связано с уточнением всех трех параметров поверхности: альбедо, параметра Боуэна и шероховатости, из которых наиболее существенным является последний.

Выводы в литературе о влиянии на модельные концентрации трех параметров поверхности, используемых AERMOD (альбедо, шероховатость и коэффициент Боуэна) были сделаны в основном по исследованиям изолированных источников. Данная работа развивает эти выводы для реальных промышленных комплексов с несколькими источниками.