ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДА КРАСНОЯРСКА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

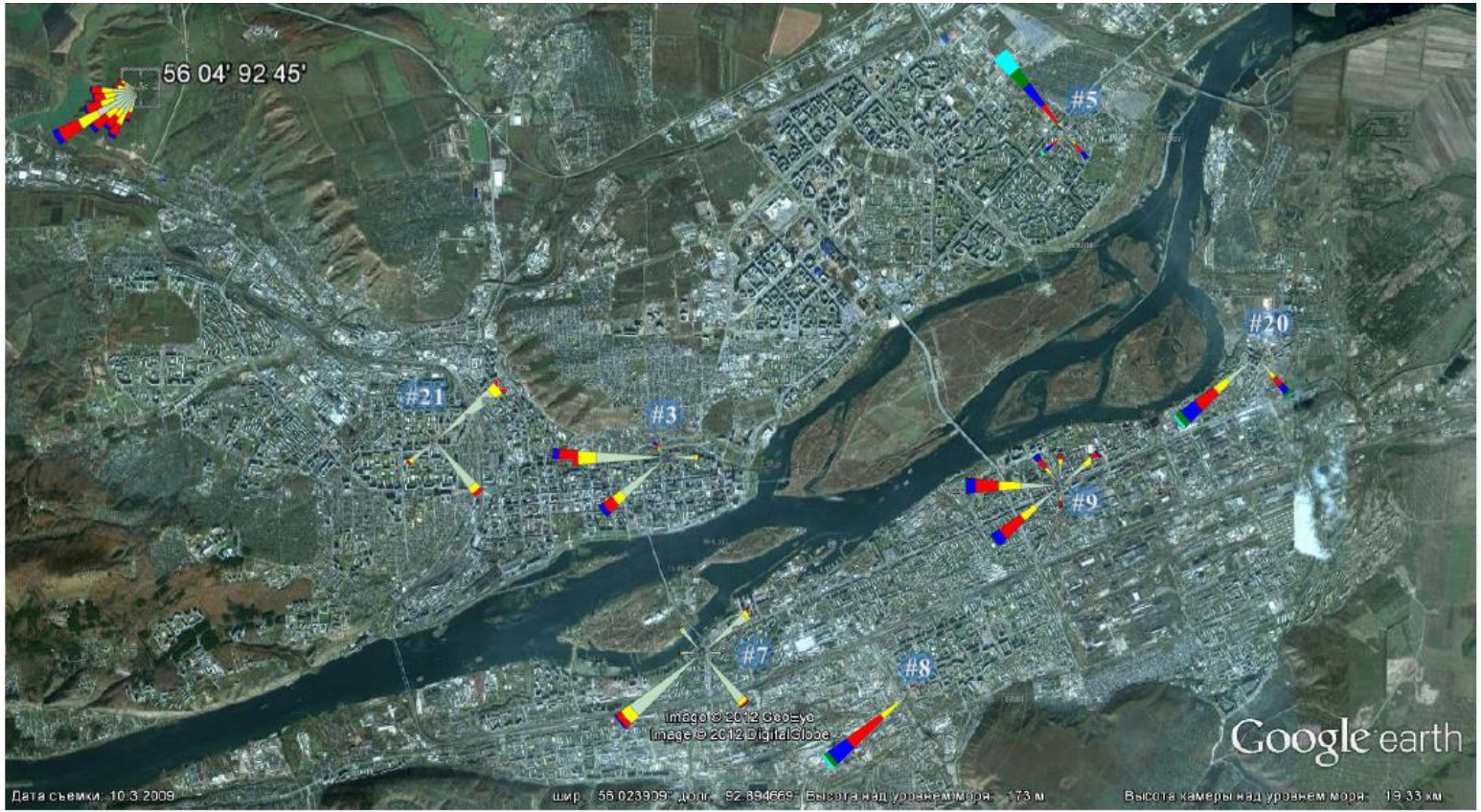
А.А. Леженин, С.В. Михайлюта***

* Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

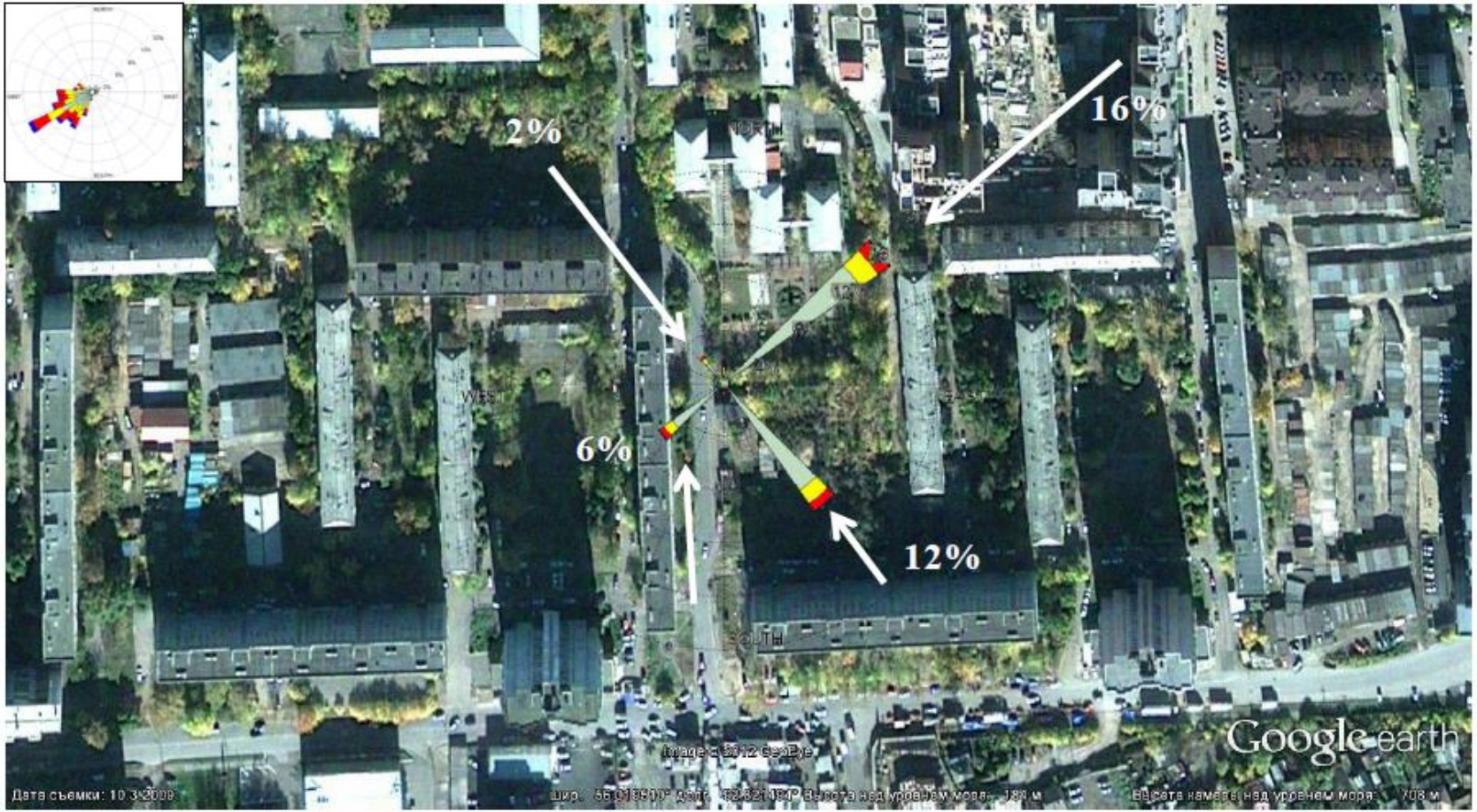
** Ассоциация экологических расследований, г. Красноярск

Научно-практическая конференция по проблемам гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири (к 50-летию образования ФГБУ СибНИГМИ), г. Новосибирск, 20-22 октября 2021 г.

Wind fields, averaged for 20 years



Mikhailuta S.V., Lezhenin A.A., Pitt A., Taseiko O.V. Urban wind fields: Phenomena in transformation // Urban Climate. Vol. 19. 2017. P. 122–140.


2%
16%
6%
12%
Google earth

41%
5%
14%
14%
Image © 2012 GeoEye
Google earth
Дата съемки: 10.3.2009
Высота камеры над уровнем моря

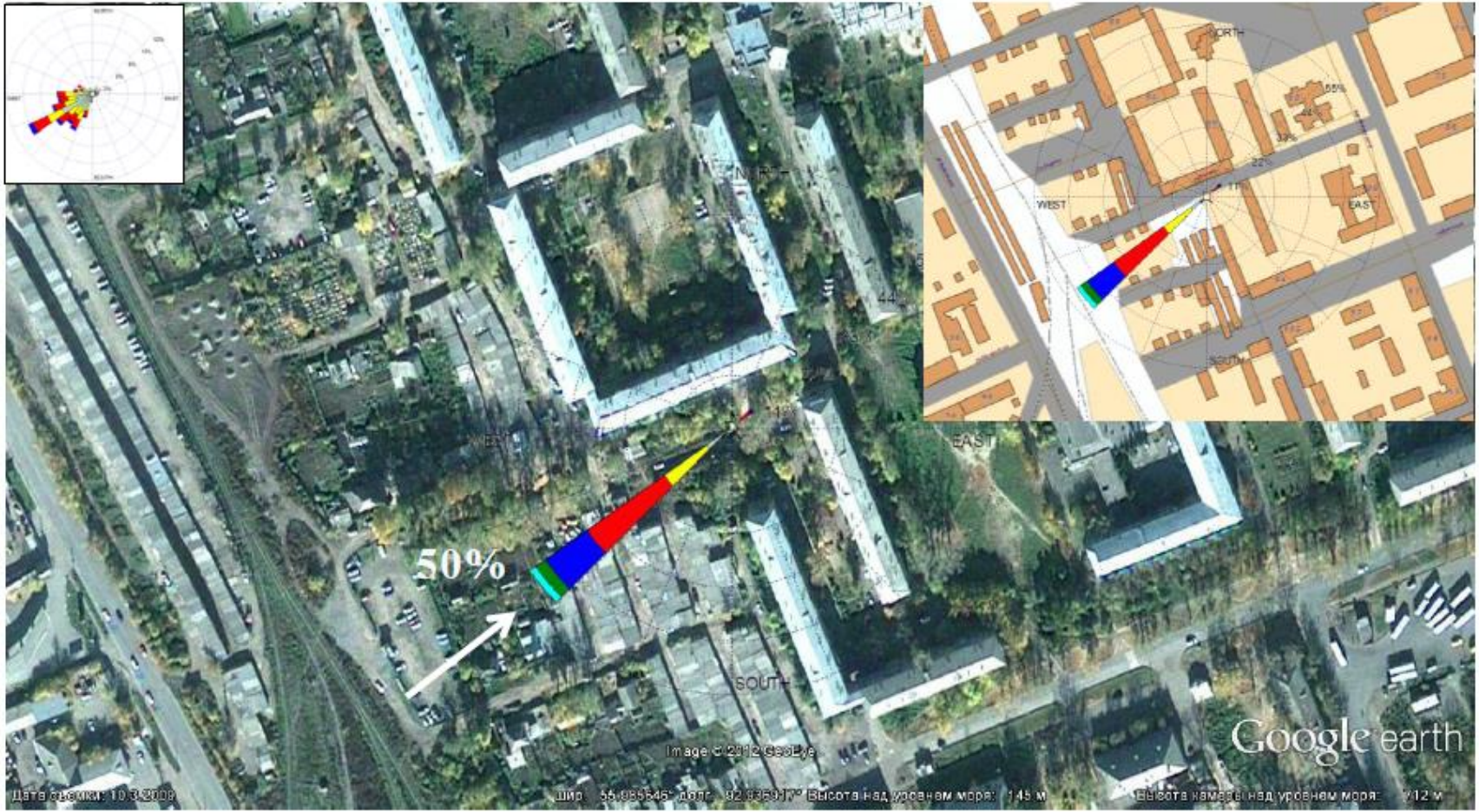

NORTH
WEST
EAST
SOUTH
50%
Google earth

Таблица. Особенности трансформации ветровых потоков в городской застройке г. Красноярска

№	Пункт наблюдения	Преобладающие направления ветра	Повторяемость преобладающих ветров, %	Повторяемость штилей, %	Средняя скорость ветра, м/с	Изменение скорости ветра, м/с	Коэффициент корреляции между скоростями ветра в пункте и на метеостанции
1	Метеостанция	200-280°, ЮЗ + З	55	15	2.3	0	1
2	#21	45-55°, СВ 135-145°, ЮВ	16 12	60	0.8	−1.5	0.01
3	#3	225-235°, ЮЗ 270-280°, З	25 18	30	1.4	−0.9	0.72
4	#5	135-145°, ЮВ 225-235°, ЮЗ 315-325°, СЗ	14 14 41	18	3.6	+1.3	0.74
5	#7	45-55°, СВ 135-145°, ЮВ 225-235°, ЮЗ	15 20 23	27	1.2	−1.1	0.86
6	#8	225-235°, ЮЗ	50	30	3.3	+1.0	0.53
7	#9	355-365°, С 45-55°, СВ 175-185°, Ю 225-235°, ЮЗ 265-275°, З 315-325°, СЗ	11 12 6 20 24 9	8	2.8	+0.5	0.76
8	#20	135-145°, ЮВ 225-235°, ЮЗ	14 27	46	3.1	+0.8	0.85

Инвентаризация выбросов

Инвентаризация выбросов, 1986 год – 80 загрязняющих веществ

Сводный том ПДВ для г. Красноярск, 2005 год:

- 443 промышленных объекта,
- 6381 стационарный источник,
- 203 ЗВ

Сводный том ПДВ для г. Красноярск, 2012 год:

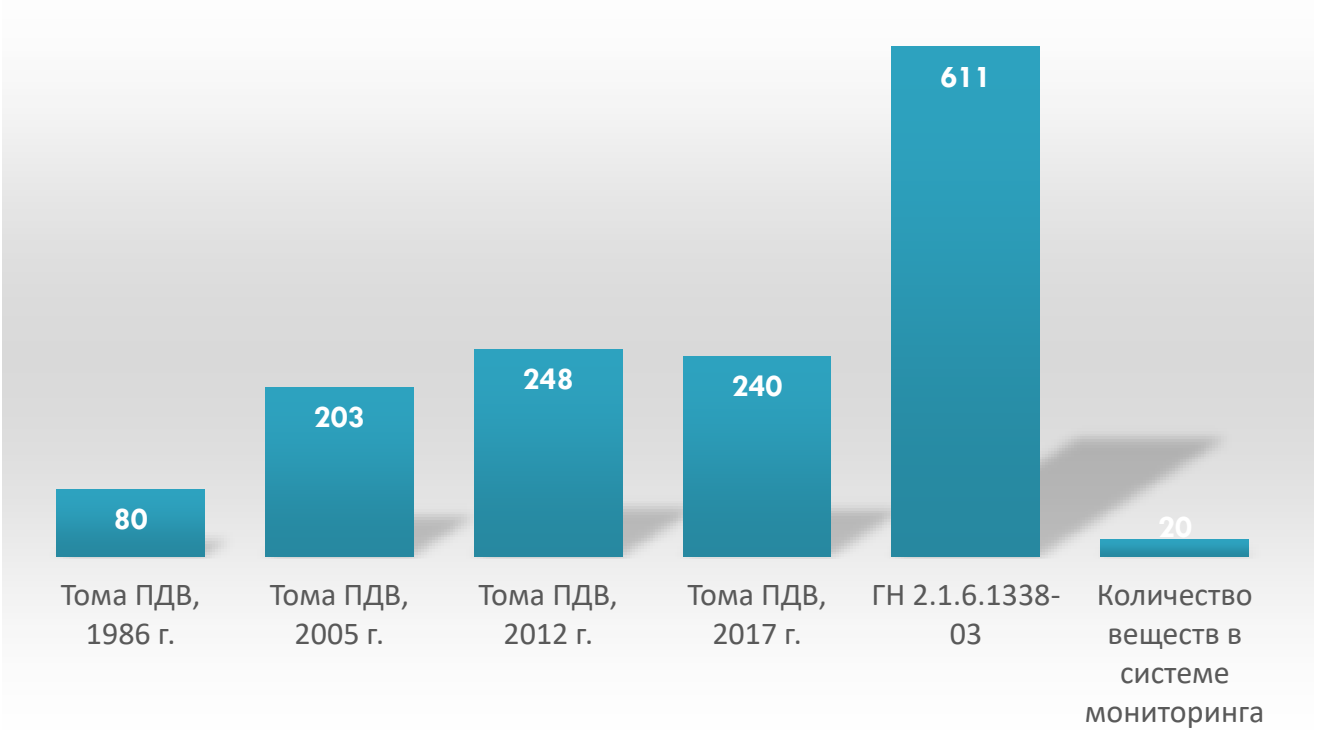
- 649 промышленных объектов,
- 6086 стационарных источников,

- 248 ЗВ (96.9% - NO_2, SO_2, CO, PM, C, NO, CH_3, Бензин, Керосин)

- **20 ЗВ для которых С > 1 ПДК** (из них 1, 2 и 3 КО – Бп, Тетрахлорэтилен, Al_2O_3, HF, Бензол, Mn, Метилбензол, С, Бутилацетат, Этантиол, PM, Fe_2O_3, NO_2 (**формальдегид в этот список не входит**)

- Вещества для которых расчетная С > 0.5 ПДК – Циклогексанон, PM, Алканы, Метанол, Меркаптаны, Бутан, Формальдегид (0.77), Керосин, Этилацетат, Пентан, Уайт-спирт, Cr (VI)

Что в воздухе?



Mikhailuta S.V., Taseiko O.V., Pitt A., Lezhenin A.A., Zakharov Y.V. Seasonal variations of air pollutant concentrations within Krasnoyarsk City // Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 149, Numbers 1-4. 2009. P.329-341.

Taseiko O.V., Mikhailuta S.V., Pitt A., Lezhenin A.A., Zakharov Y.V. Air pollution dispersion within urban street canyons // Atmospheric Environment, V.43., 2009. P. 245-252.

Изменение объемов выбросов загрязняющих веществ в г. Красноярске, промышленные предприятия

Резкое увеличение выбросов керосина (с 28 до 161 т/год) и сажи (с 500 до 3798 т/год) между 2005 и 2012 годами, связано не с увеличением объемов производства, а с очередным пересмотром методик инвентаризации выбросов. (Сводные тома ПДВ)

Загрязняющее вещество	Объем выбросов, тонн/год			Изменение
	1986	2005	2012	
CO	277 170	101 778	73 738	-
SO_2	54 211	40 795	35 296	-
NO_2	-	19 496	17 209	-
NO	-	2 301	2 595	~
Сажа	-	579	3 798	+
Бензин	838	219	109	-
Керосин	84	28	161	+
Формальдегид	18	8	29	+
Бенз(а)пирен	-	3	2	~
1,3-Бутадиен	450	112	108	-
Бензол	490	4,2	7,2	+
Ацетальдегид	4,5	0,01	1,6	+

Михайлюта С.В., Леженин А.А., Гудовский П.Г. Концентрации бенз(а)пирена в атмосфере г. Красноярска в летний и зимний периоды // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 1. № 4. С. 249-255.

Михайлюта С.В., Леженин А.А., Гудовский П.Г. Ацетальдегид в атмосферном воздухе г. Красноярска // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т.4. № 1. С. 106-112.

Изменение объемов эмиссии загрязняющих веществ в г. Красноярске, автотранспорт

Видим резкое повышение удельных объемов эмиссии для сажи (в 10 раз), для керосина – в 7 раз, увеличение в 5 раз для диоксида азота, и в 2 раза – для бензина (Сводные тома ПДВ)

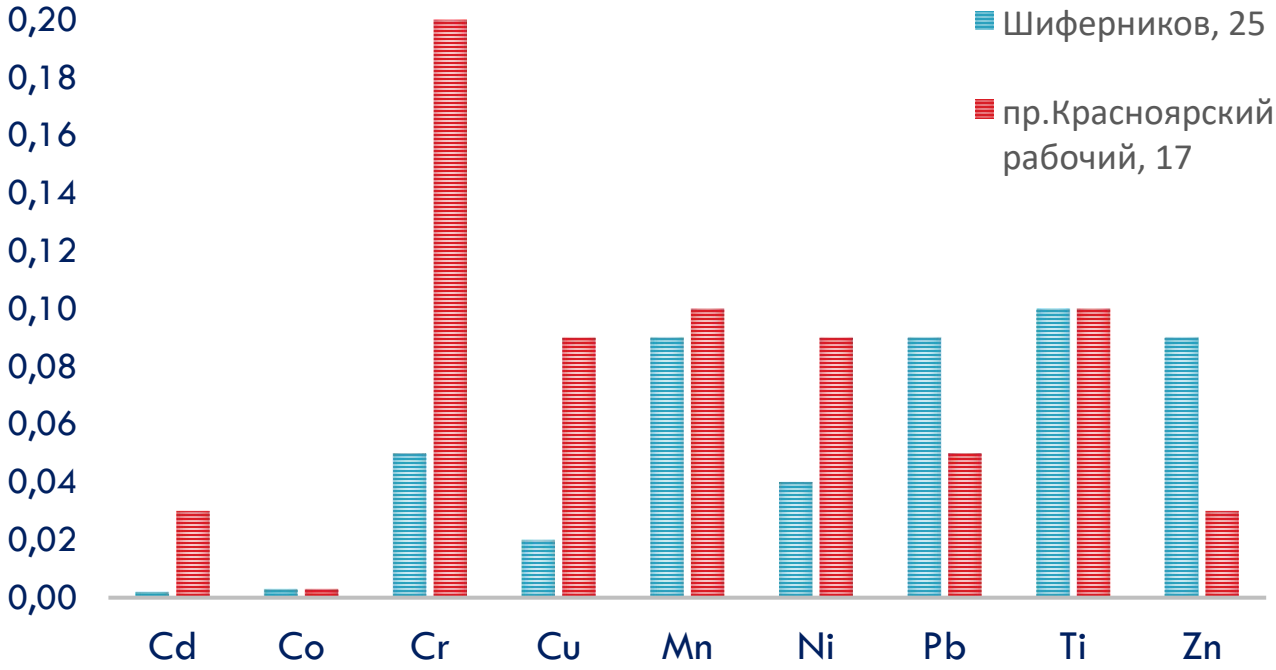
Загрязняющее вещество	Объем выбросов, тонн/год		Объем выбросов, тонн/год на 1000 автомобилей	
	2005 г. (~300 тыс. авт.)	2012 г. (~400 тыс. авт.)	2005 г.	2012 г.
CO	31152	42722	104	107
NO	-	2724	-	7
NO_2	2640	16761	9	42
SO_2	176	201	0,6	0,5
Сажа	22	411	0,1	1
Бензин	3618	10344	12	26
Керосин	294	2885	1	7
Формальдегид	26	53	0,09	0,14
Бенз(а)пирен	0,004	0,005	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$

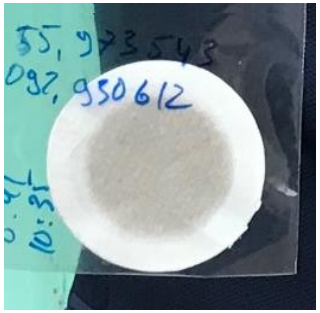
Михайлюта С.В., Кучеренко А.В., Леженин А.А. Проблемы оценки структуры выбросов в системе промышленные предприятия – автотранспорт // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 4. С. 54-58.

Распределение металлов по основным источникам выбросов (Сводные тома ПДВ)

Предприятие	Объем выбросов, тонн/год											
	Al	Fe	Mn	Cu	Cr (VI)	Cr (III)	Pb	Zn	Ni	Co	Ba	Sr
Сибинстрем	-	4,028	0,096	-	0,01500	-	-	-	-	-	1,25	-
КРАЗ	191,2	0,220	0,044	0,063	0,00060	-	0,00003	-	-	-	-	-
КРАМЗ	51,50	2,471	0,012	0,015	0,00200	-	-	-	-	-	-	-
ТЭЦ 3	-	0,142	0,003	-	0,00200	-	-	-	-	-	-	-
ТЭЦ 1	-	0,388	0,009	-	0,00030	-	-	-	-	-	-	
Красцветмет	-	0,639	0,009	-	0,00002	-	0,0004	-	-	-	-	-
Красмаш	1,196	2,254	0,009	-	0,10600	-	-	-	0,0001	-	0,06	-
Цемзавод	-	0,096	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ТЭЦ 2	-	0,946	0,023	-	0,00400	-	-	-	-	-	-	-
Сумма	**243,9**	**11,20**	**0,206**	**0,078**	**0,130**	-	**0,00043**	-	**0,0001**	-	**1,31**	-
% от всех выбросов	**97,6%**	**23,5%**	**13,5%**	**12,2%**	**43,3%**	-	**7,2%**	-	**2,5%**	-	**98,5%**	-
Все предприятия города	**249,9**	**46,7**	**1,53**	**0,639**	**0,300**	**0,01**	**0,006**	**0,007**	**0,004**	**0,0001**	**1,33**	-

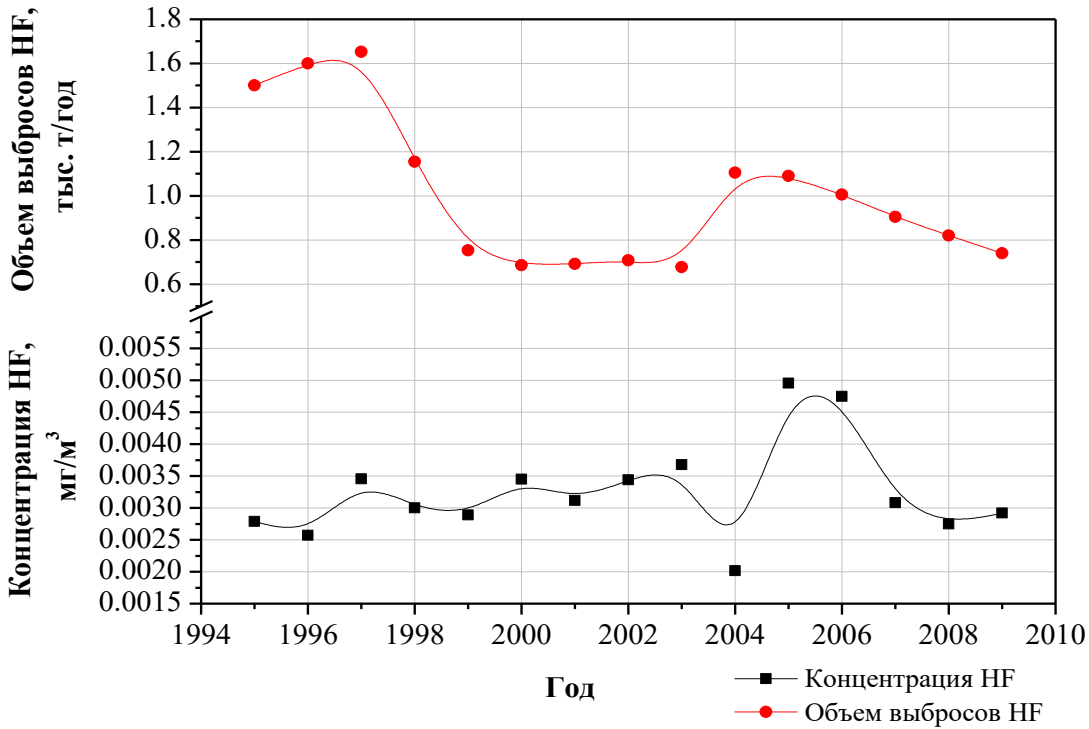
Металлы в воздухе, мкг/м^3





Июль-авг. 2020 г.

Изменение объема выбросов и концентраций HF – нет соответствия между объемами выбросов и концентрациями на постах



Михайлюта С.В., Леженин А.А. Релевантность станций контроля загрязнения атмосферного воздуха // Экология и промышленность России, 2015. Т. 19. № 11. С. 50–55.

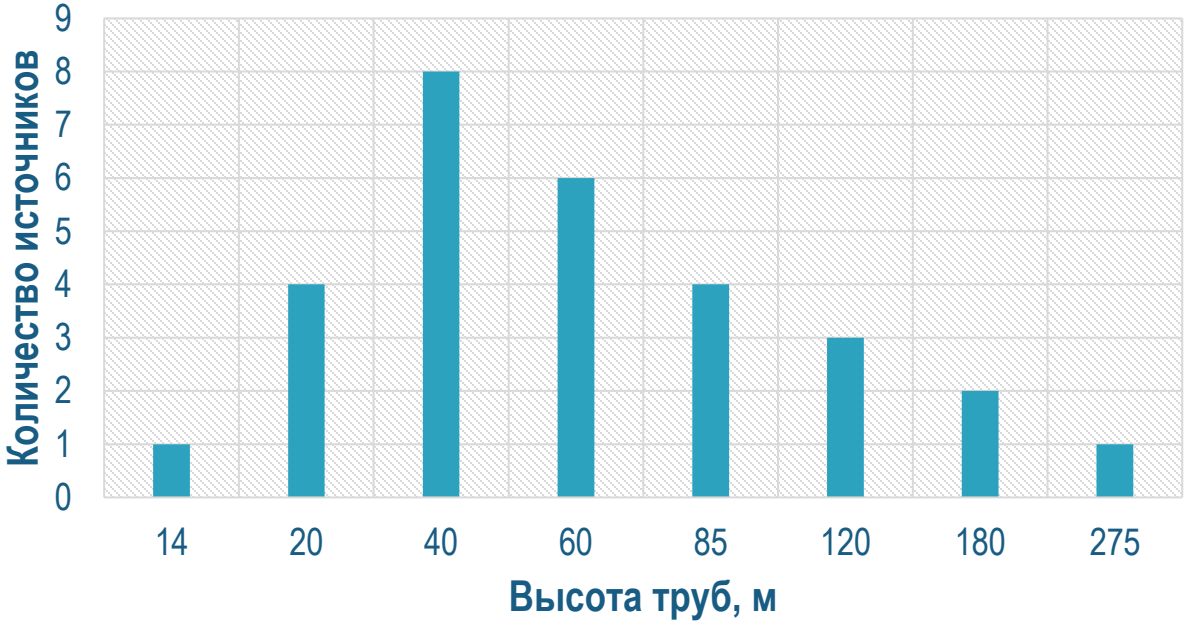
Источники выбросов сажи на территории г. Красноярска

Mikhailuta S.V., Lezhenin A.A. Black Carbon, Soot and Dust Particles in the Atmosphere of an Industrial City // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. Т. 24. № 4, С. 447–453.

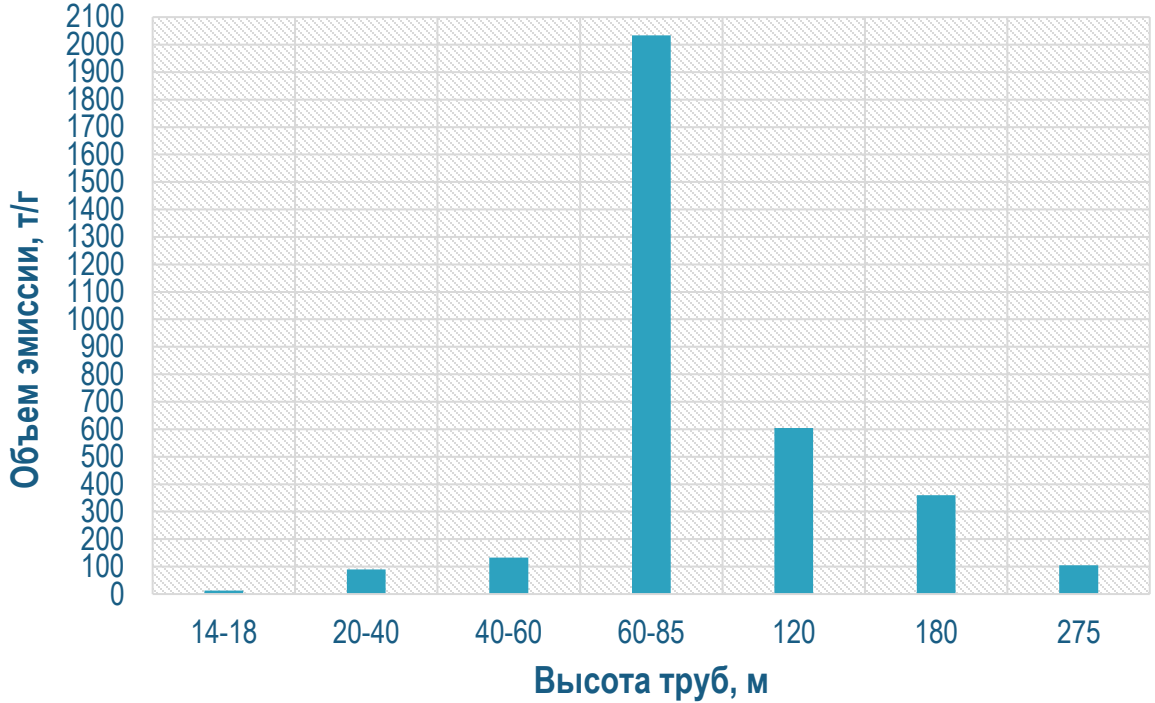
Сажа

Предприятие	Объем выбросов сажи, т/год	Доля от общего объема выбросов	Расположение, м над ур.м.	Высота источника выбросов, м
РУСАЛ Красноярск	**1670**	**39,7%**	**180**	**80**
КрасТЭК, котельная №1	85,5	6,2%	180	65-85
КрасТЭК, котельная №2	60,8		175	50-80
КрасТЭК, котельная №3	13,7		250	45
КрасТЭК, котельная №4	10,4		-	45
КрасТЭК, котельная №5	57,8		195	45-50
КрасТЭК, котельная №6	3,4		-	25
КрасТЭК, котельная №7	3,0		-	15
КрасТЭК, котельная №10	2,0		-	31
КрасТЭК, котельная №11	1,2		-	40
КрасТЭК, котельная №12	24,1		-	50
Красноярская ТЭЦ-1	**339,5**	**11%**	**150**	**105 - 180**
Красноярская ТЭЦ-2	**20,6**		**160**	**180**
Красноярская ТЭЦ-3	**105,4**		**160**	**180 - 275**
Региональная тепловая компания	166,4	4%		120
ФармЭнерго	193,3	4,6%	150	70
Электровагоноремонтный завод	222,2	5,3%	150	120
Автотранспорт г. Красноярска	**410,7**	**9,8%**	**140 - 320**	**0,2**
Все остальные предприятия	819	19,5%	140 – 320	> 100

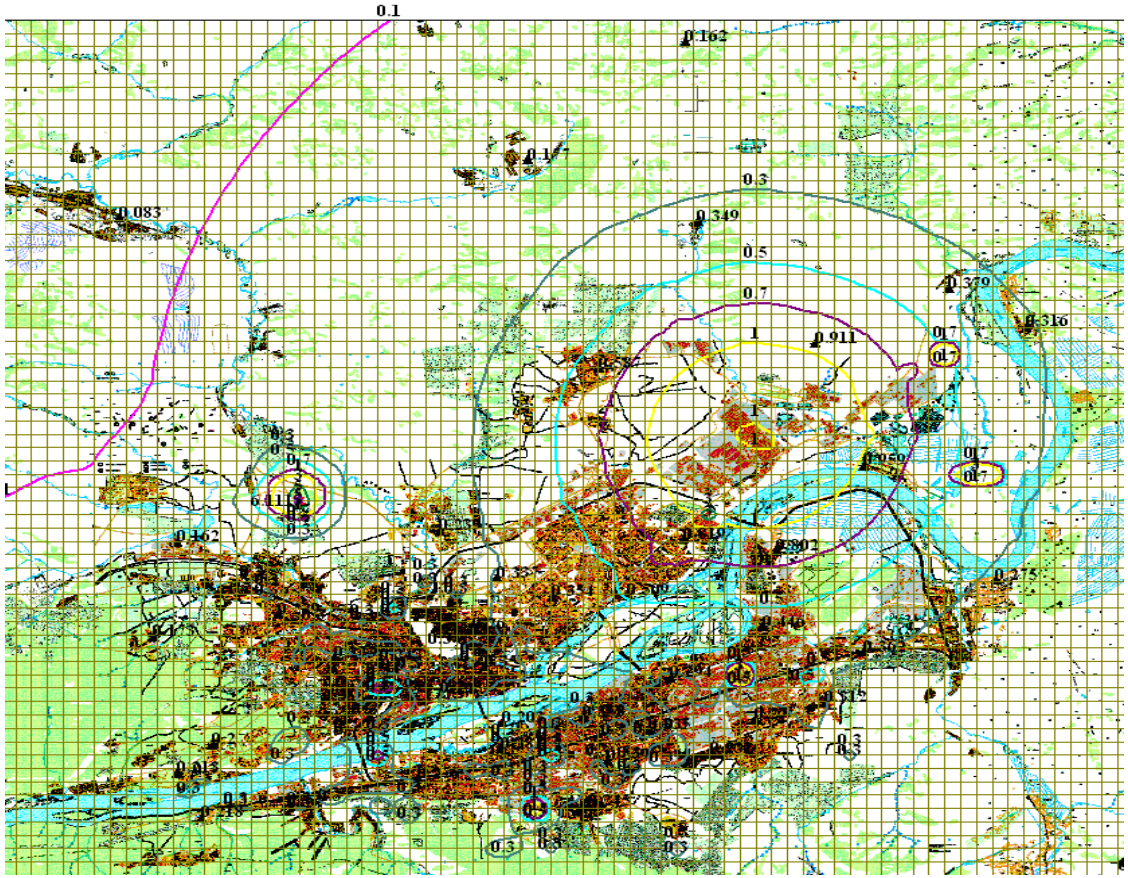
Распределение основных источников сажи по высотам труб



Распределение объемов выбросов по высотам труб на территории г. Красноярска



Расчётные изолинии концентраций сажи на территории г. Красноярска



Согласно расчетам рассеяния выбросов, выполненным в сводных томах ПДВ для г.Красноярска, концентрация сажи во всех районах города находится на уровне ПДК м.р.

Объем выбросов сажи составляет только около 3% от валового объема эмиссии.

Аналогичная картина наблюдается и для многих других опасных и канцерогенных загрязняющих веществ

Факторы неудовлетворительной экологической обстановки в г. Красноярске

Большая нагрузка на атмосферный воздух со стороны промышленных предприятий

Использование устаревших и неэффективных решений в процедурах нормирования выбросов, мониторинга состояния и загрязнения атмосферного воздуха и расследования эпизодов загрязнения

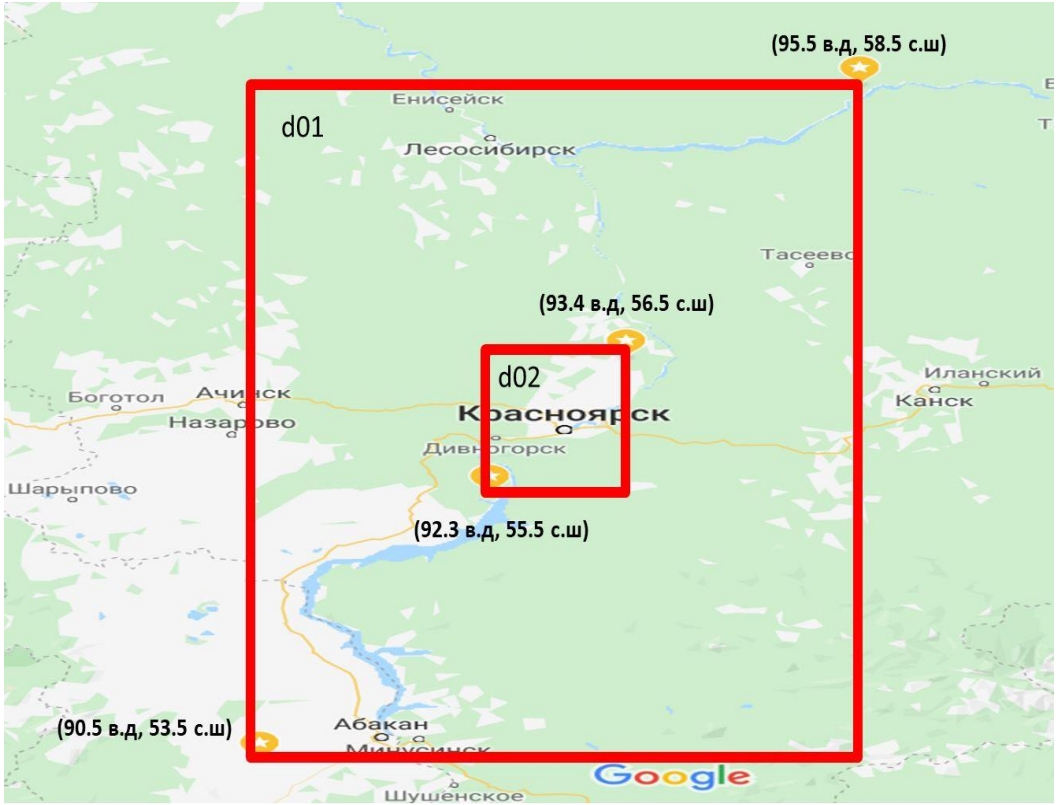
Для численного моделирования атмосферных циркуляций и распространения выбросов над территорией г. Красноярска была использована модель Weather Research and Forecasting (WRF-Chem)

Модель WRF является результатом совместной работы многих научных организаций, руководимых Национальным центром атмосферных исследований (NCAR) США и представляет собой целое семейство численных моделей, которые успешно применяются как для оперативного прогнозирования погоды, так и для исследовательских целей.

В модели применяется параметризация процессов подсеточного масштаба: длинноволновой и коротковолновой радиации, крупномасштабной конденсации, конвекции в кучевых облаках, микрофизических процессов, также процессов планетарного пограничного слоя и приземного слоя, подстилающей поверхности.

Результаты численного моделирования позволяют получить физически обоснованные метеорологические поля высокого пространственного разрешения.

Конфигурация расчетной области



Для проведения вычислений по модели были определены расчетные области с центром – местоположение г. Красноярска. Выбрано два домена для расчетов

Первый домен - область 500 х 500 км рассчитывалась на сетке 200х200 узлов с шагом 2.5 км.

Вложенная область расчета 100 на 100 км считается на сетке 200х200 узлов с шагом 0.5 км.

Выбор такой конфигурации расчетных областей объясняется возможностью модели детализировать атмосферные циркуляции в пространственно-временном масштабе, который соответствует описанию мезометеорологических процессов

По вертикали для обоих доменов принято 29 уровней до высоты 20 км со сгущением в атмосферном пограничном слое

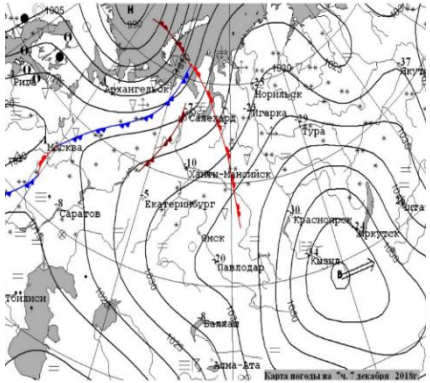
(29, 99, 195, 317, 470, 664, 902, 1252, 1704, 2177, 2674, 3402, 4351, 5300, 6248, 7191, 8127, 9059, 9996, 10959, 11965, 13016, 14086, 15150, 16207, 17261, 18312, 19361, 20407 м от поверхности земли).

Такой выбор вертикального разрешения предложен в базовой версии модели WRF

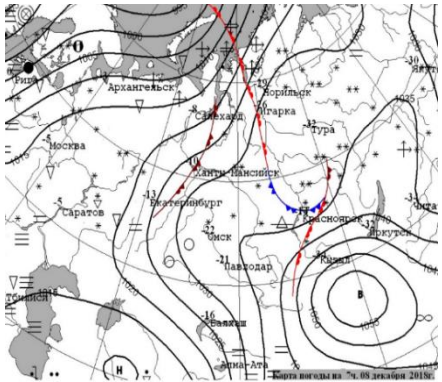
Расчеты метеорологического режима, переноса и рассеивания примесей над исследуемой территорией выполнены для типичных зимних (6 – 10 декабря), летних (27 -31 июля) и весенних (2 – 6 мая) условий 2018 г.

Все расчеты выполнены с использованием ресурсов ЦКП Сибирский Суперкомпьютерный центр Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (http://www.sscc.icmmg.nsc.ru/) на кластере НКС-30Т на 64-х ядрах

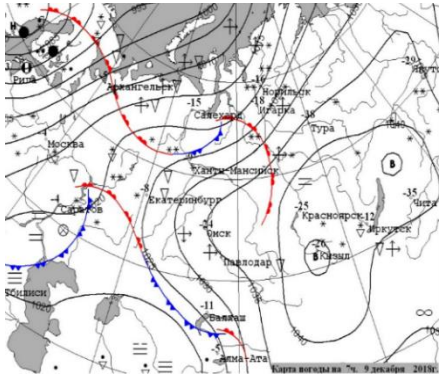
Синоптические карты, 8 – 9 декабря 2018 г.



Утром 7 декабря погоду над южными территориями Красноярского края и г.Красноярска определял антициклон с центром около г. Кызыл.
Наблюдались низкие приземные температуры (до –30°С), штилевые условия и мощные температурные инверсии в нижней части атмосферного пограничного слоя



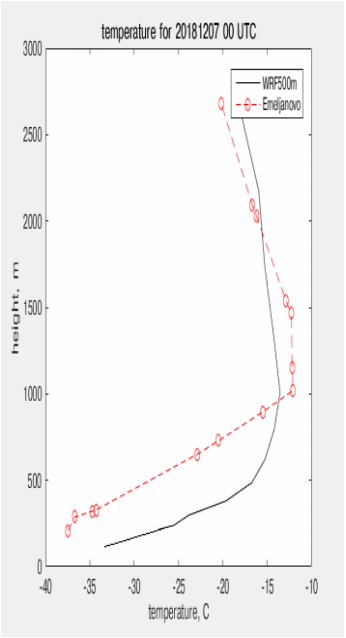
В течение следующего дня, 8 декабря проходил атмосферный фронт окклюзии с сильным ветром (с порывами до 12 м/с).
Днем и вечером у земли температура на метеостанции повысилась до – 13.4°С



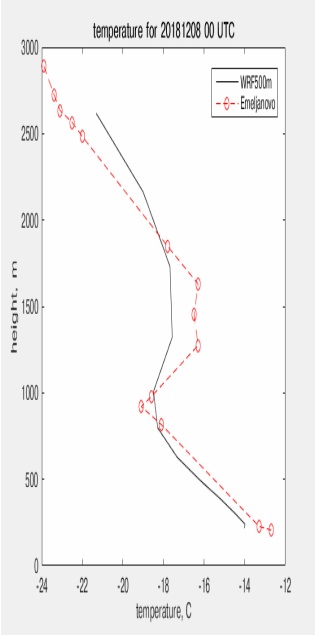
Утром 9 декабря погоду в Красноярске снова определял барический гребень
Наблюдался штиль, приземная температура воздуха понизилась до –25°С

http://meteo.krasnoyarsk.ru/map_p/gis_map2.aspx

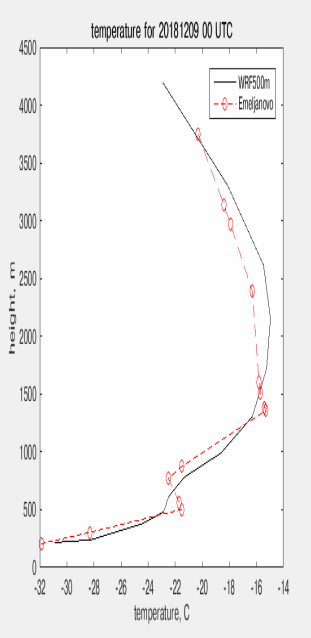
Рассчитанные с помощью WRF и наблюдаемые (на аэрологической станции Емельяново) профили температуры



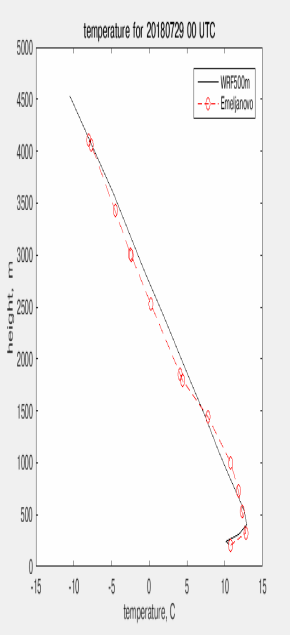
07 ч. мест. времени, 7 декабря 2018 г.



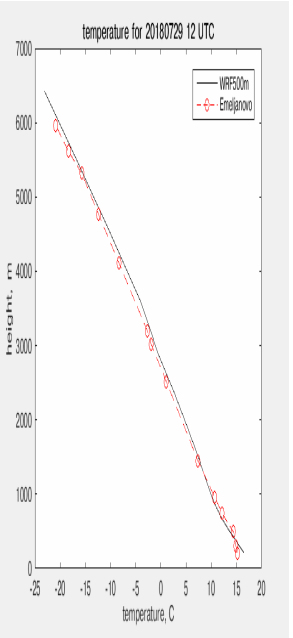
07 ч. мест. времени, 8 декабря 2018 г.



07 ч. мест. времени, 9 декабря 2018 г



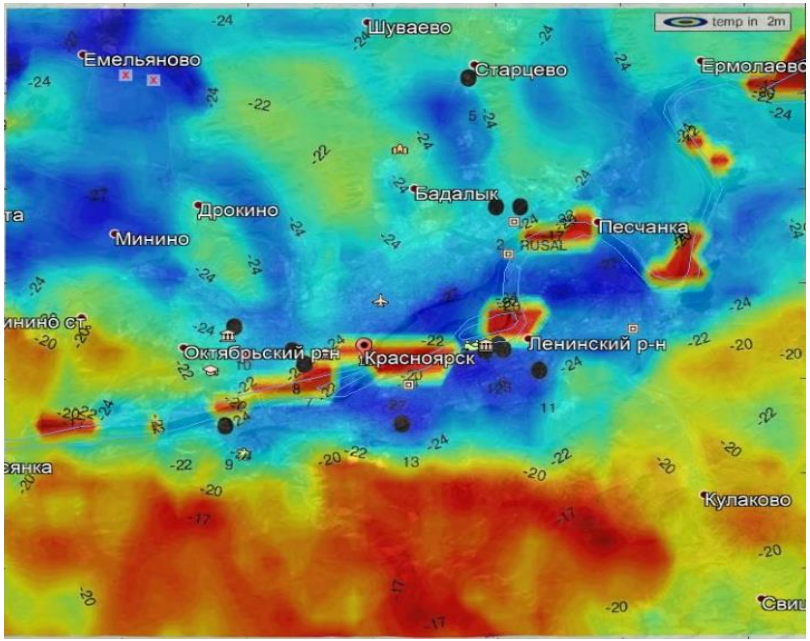
07 ч. мест. времени, 29 июля 2018 г



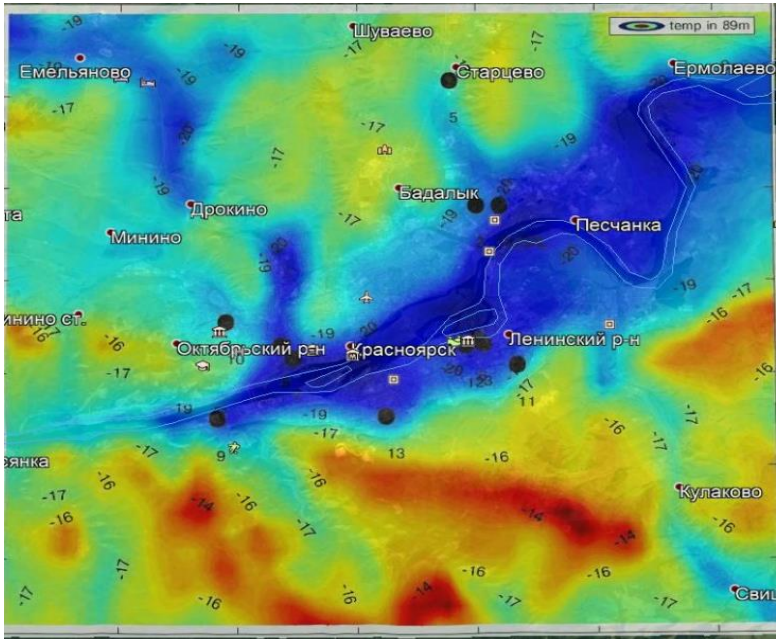
19 ч. мест. времени, 29 июля 2018 г

WRF адекватно воспроизводит как утреннюю, так и вечернюю температурную стратификацию

Рассчитанные поля приземной температуры воздуха и температуры на высоте 90 м от поверхности земли на 07 час. местного времени 7 декабря 2018 г. Выделенная расчетная область имеет размеры 60х30 км, шаг сетки 500 м



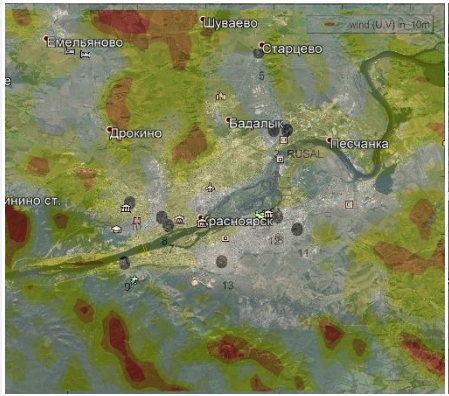
Температура воздуха приземного слоя в центральной части города на 6-7 °С ниже, чем на периферии



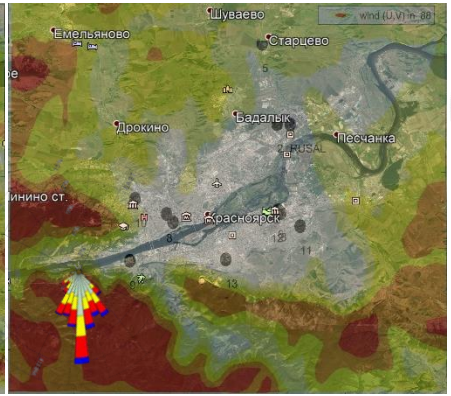
Рассчитанная на высоте 90 м. температура на 07 ч, 7 декабря 2018 г.

При наличии температурной инверсии и слабых ветров холодный воздух занимает пониженные формы рельефа и тем самым формируется неоднородное поле температуры воздуха по территории города.

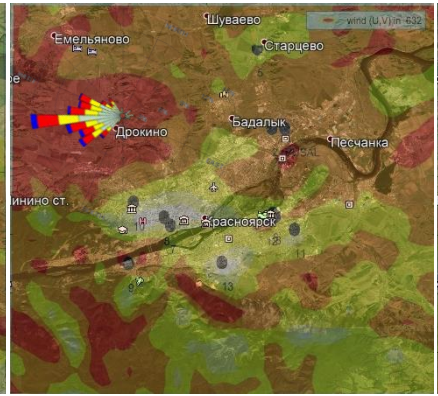
Рассчитанное поле ветра над г. Красноярском на высотах 10, 90, 630 и 900 м от поверхности земли



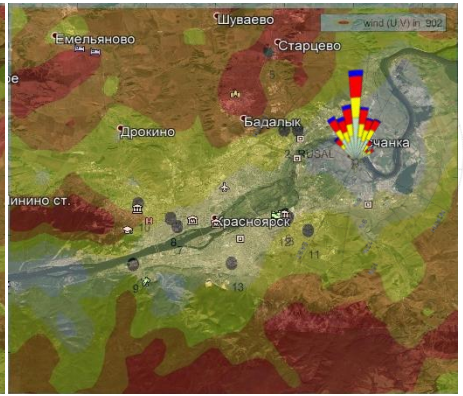
Рассчитанное поле ветра на высоте 10 м
Штилевые зоны в центральной части города



Рассчитанное поле ветра на высоте 90 м
Штилевые зоны в центральной части города.
На периферии направление ветра - южное



Высота 630 м - Доминирующие ветра - западные

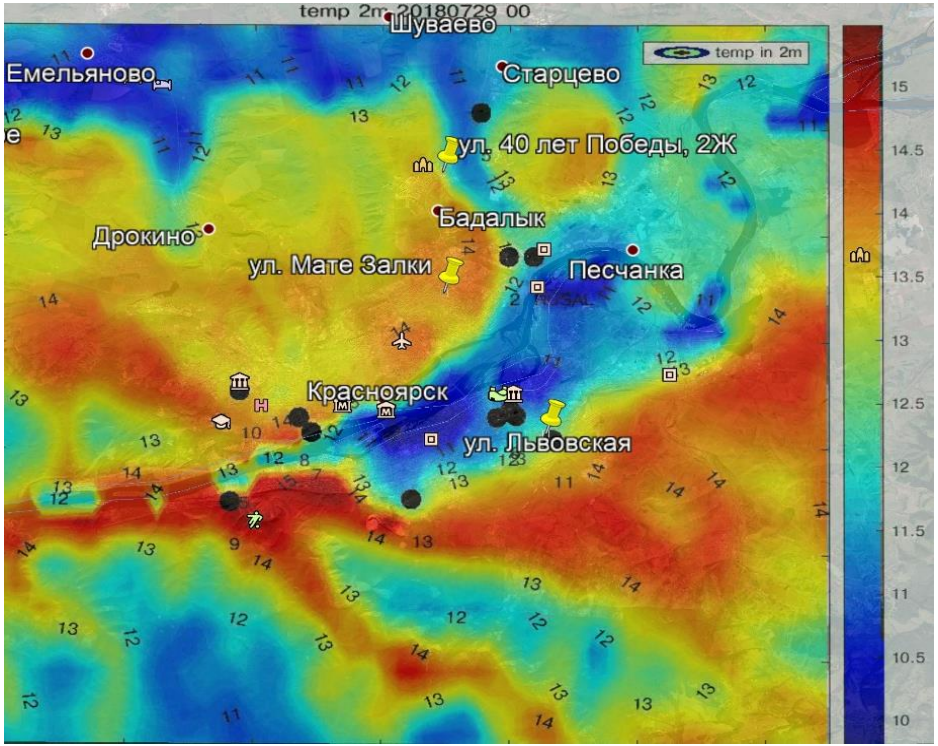


Высота 900 м - Основное направление ветра - северное

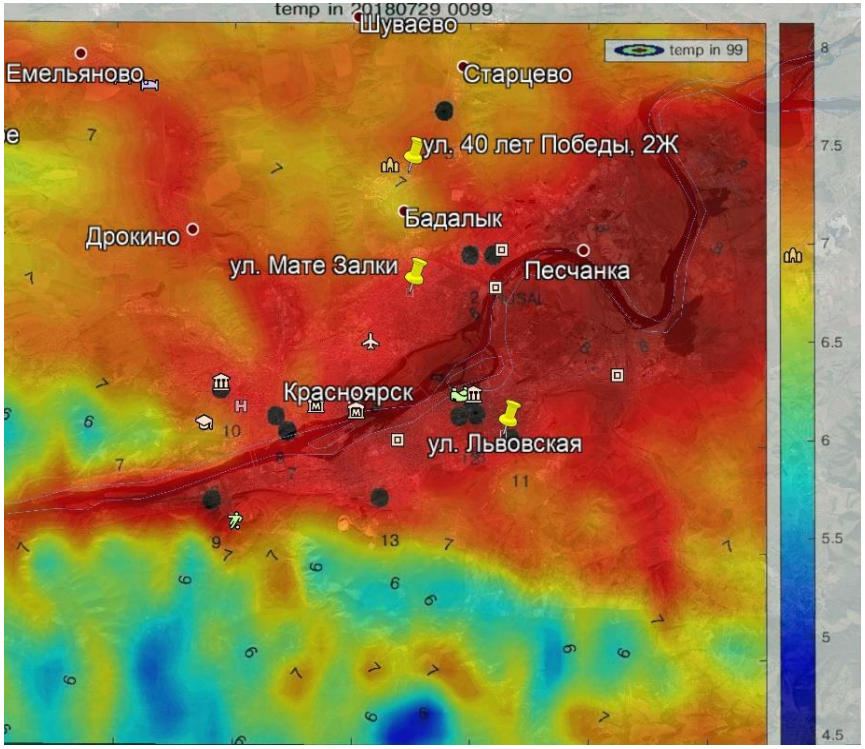
На периферии направление ветра - южное. С высотой картина полей ветра существенно изменяется. На высотах около 600 м от поверхности земли доминируют западные ветра, а на высотах более 800 м основное направление ветра - северное.

Таким образом, в нижнем километровом слое направление ветра изменяется от южного до северного, что обеспечивает возвратные ветровые потоки.

Метеорологический режим над городом для 29 июля 2018 г



Температура на высоте 2 м
В центральной и северной части расчетной области температура воздуха на 3 - 4°С ниже, чем на окружающей местности

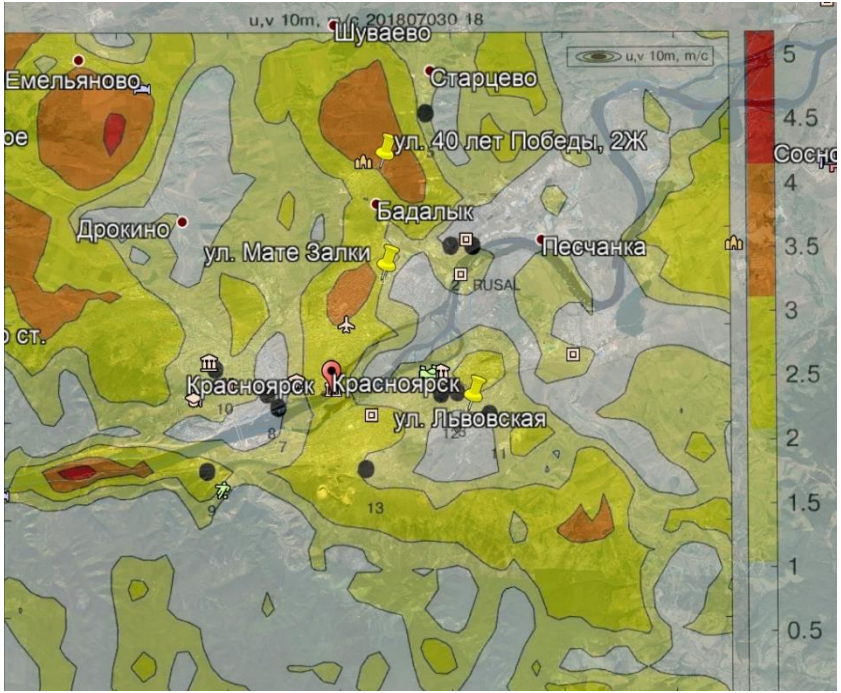


Температура на высоте 100 м
Над центральной частью области счета температура на 2 - 4 °С выше, чем над южной частью

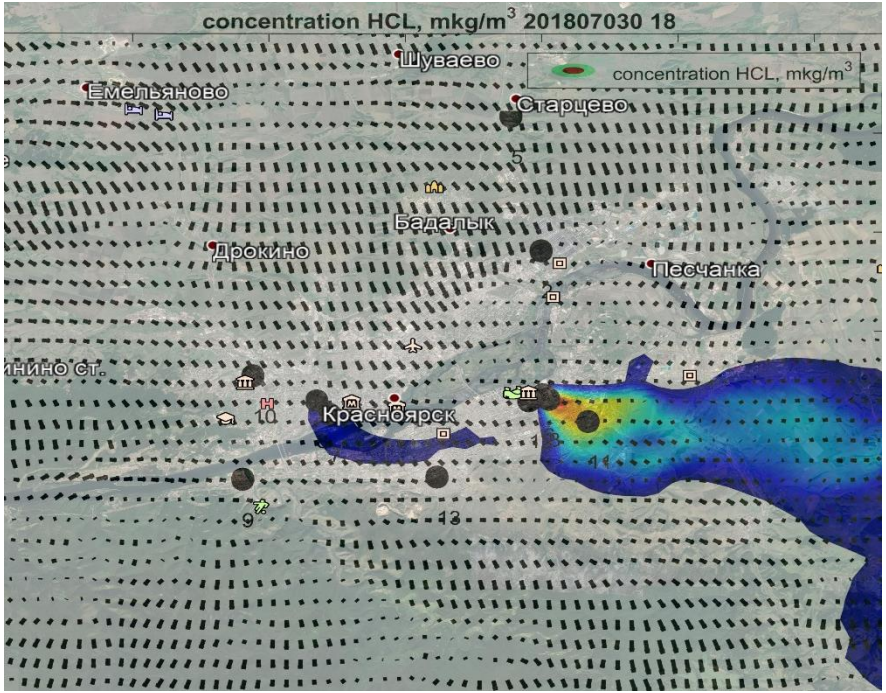
В зимних условиях в нижних слоях атмосферы в долине р.Енисей образовываются штилевые зоны, способствующие накоплению загрязняющих примесей;

В нижнем километровом слое направление ветра изменяется от южного до северного, что обеспечивает возвратные ветровые потоки

В весенние и летние периоды результаты вычислений также показывают на наличие застойных зон в приземном слое атмосферы.

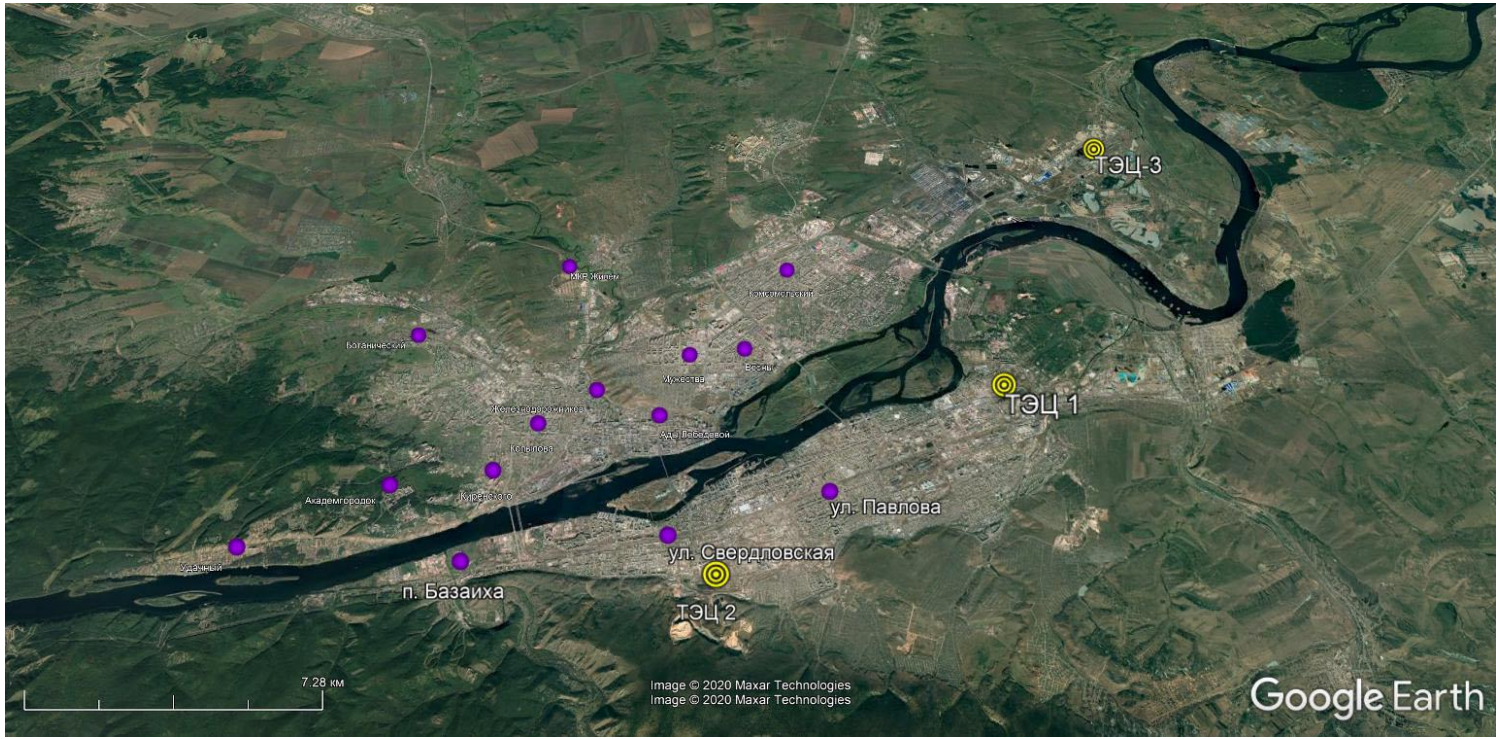


Изолинии модуля скорости приземного ветра на 01 ч. мест. времени 31 июля 2018 г. Большая неоднородность приземного ветра по территории города как по скорости, так и по направлениям. Выявляются зоны со скоростями ветра 3 - 5 м/с и области слабых ветров 0,5 – 2 м/с. Преобладают ветры северных и северо-западных направлений.



Поля концентраций (мкг/м^3) и скорости приземного ветра на 01 ч. мест. времени 31 июля 2018 г. Доминируют выбросы источников ОАО «Красцветмет» в восточном направлении.

ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ ТЭЦ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА Г. КРАСНОЯРСКА



Расположение крупных ТЭЦ г. Красноярска – желтые точки и наземные станции измерений концентраций PM2.5 в атмосферном воздухе (https://ru.nebo.live)

Михайлюта С.В., Леженин А.А., Коробов О.А. Влияние выбросов ТЭЦ на загрязнение атмосферного воздуха в г. Красноярске // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т.4. № 1. С. 105-112.

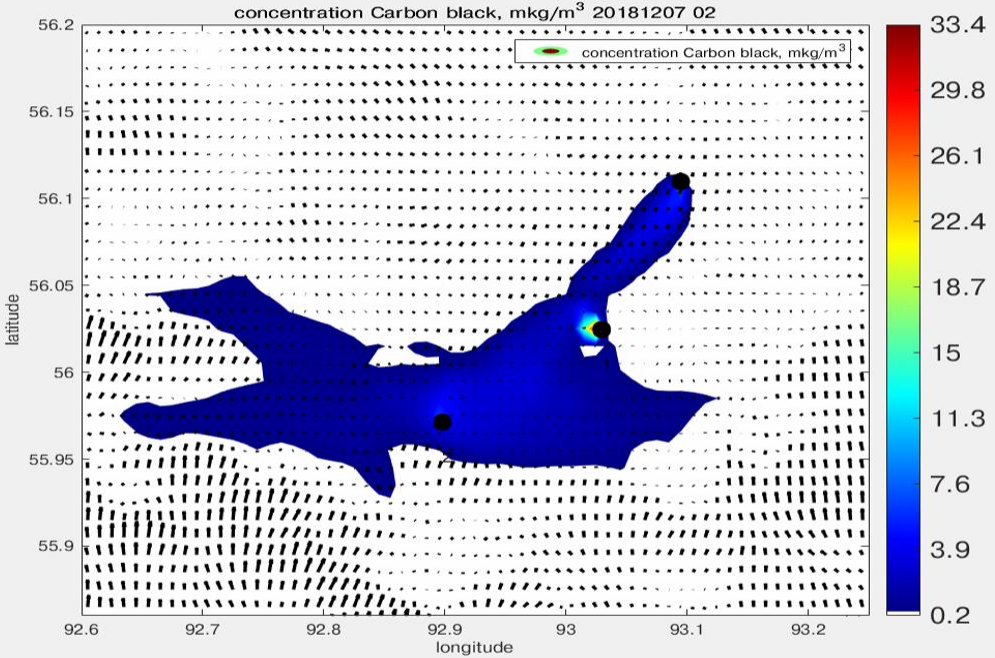
Таблица

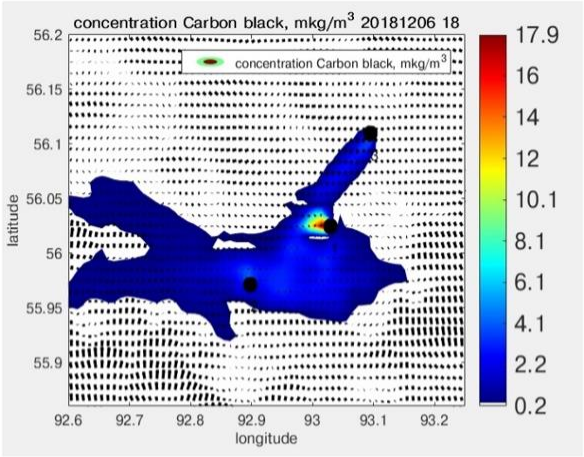
Параметры источников выбросов сажи, принятые для расчета рассеяния

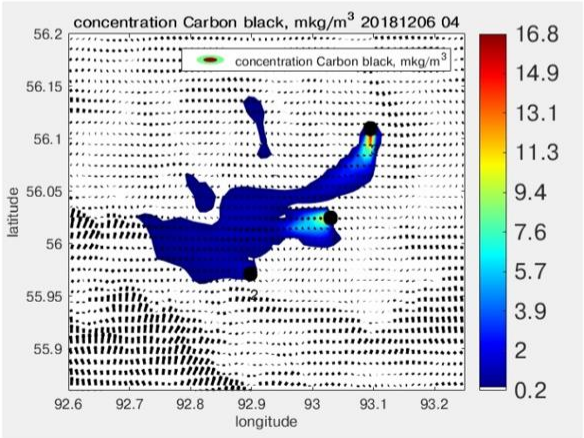
Источник / температура выброса	Объем выбросов, сажа, тонн в год	Высота источника, м	Координаты
ТЭЦ – 1 / 176°С	339.5	180	56.024365 93.029789
ТЭЦ – 2 / 166°С	20.6	180	55.970737 92.898582
ТЭЦ – 3 / 170°С	105.4	275	56.109683 93.094849

Для верификации расчетных данных использованы результаты наземных измерений (https://ru.nebo.live).

Пример картины рассеивания выбросов, полученной с помощью модели WRF-Chem для г. Красноярска



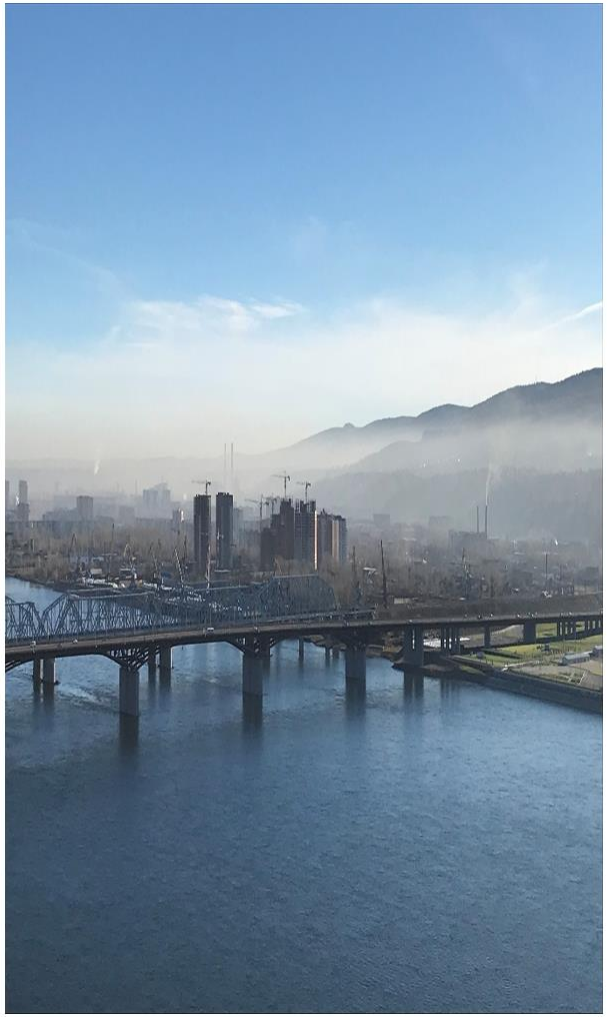


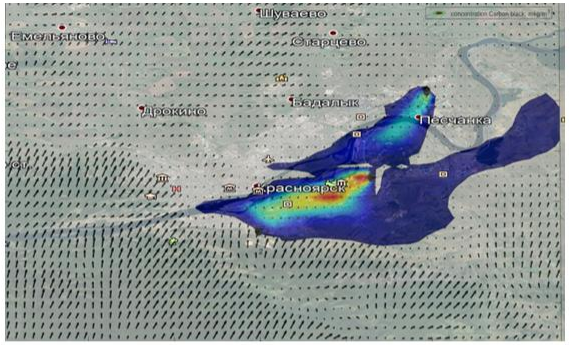


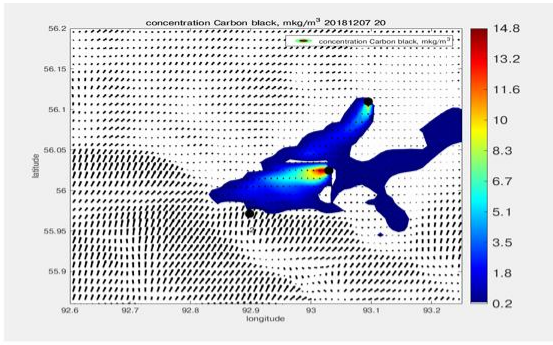
Рассеивание мелкодисперсной пыли от ТЭЦ 1, 2 и ТЭЦ 3 в атмосфере над г. Красноярском

Рис. 3. – Приземные концентрации (мкг/м3) мелкодисперсной пыли в пунктах измерений на правом берегу р. Енисей (в правом углу поле концентрации сажи на высоте 20 м над поверхностью земли с 20 ч 6 декабря до 7 ч 7 декабря 2018 г.)

Рост концентраций PM2.5 при реориенттации факелов ТЭЦ , увеличение концентраций в 200 раз







- Микроэлементный состав углей, используемых для автономных источников теплоснабжения и тепловой генерации на крупных, промышленных установках ТЭЦ на территории г. Красноярска, характеризуется широким спектром опасных для здоровья населения и окружающей среды элементов. Объём содержания этих микроэлементов находится на уровне значимом для оценки и контроля выбросов в атмосферный воздух и при определённых условиях формирует заметный (выше критического) риск для здоровья.
- Метеорологические условия, формирующиеся над г. Красноярском в периоды с неблагоприятным рассеиванием, обусловливают повышение концентраций загрязняющих веществ на большей части жилых районов города. При этом выбросы ТЭЦ наиболее интенсивно загрязняют воздух в жилых районах на правом берегу и в микрорайонах, расположенных на повышенных формах рельефа на левом берегу р. Енисей.
- В штилевых условиях в пограничном слое атмосферы в период НМУ выявленный с помощью модели WRF-CHEM разворот ветра над городом обуславливает увеличение концентраций мелкодисперсных частиц в воздухе жилых районов почти в 200 раз.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!