Оценивание характеристик подъёма дымовых выбросов от труб промышленных предприятий с использованием спутниковой информации

А.А. Леженин, В.Ф. Рапута, Р.А. Кузьминых

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

Двадцать четвертая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА", г. Москва, 9 - 13 ноября 2026 г.

Важными характеристиками подъёма дымовой струи является её траектория и скорость. Они позволяют установить предельную высоту подъёма дымовых смесей и более детально описать процессы распространения примесей в атмосфере. Наблюдения со спутников дымовых выбросов от антропогенных и природных источников создают широкие возможности для проведения этих исследований. Одним из эффективных методов изучения дымовых выбросов является теория размерности и подобия. Если ввести из физических соображений масштаб длины, связанный с потоком плавучести и величиной скорости ветра, то через него устанавливается вполне компактная зависимость высоты подъёма шлейфа с его смещением в поле ветра. Эта связь выражается так называемым «законом 2 /3», который может быть использован для оценивания траекторий и скоростей подъёма шлейфов, а также оптимизации параметров выбросов при проектировании и эксплуатации дымовых труб.

Целью работы является оценка скоростей выхода дымовых смесей из высотных труб тепловых электростанций и траекторий подъёма шлейфов с использованием спутниковой информации, моделей и методов теории подобия и размерности, данных аэрологических наблюдений.

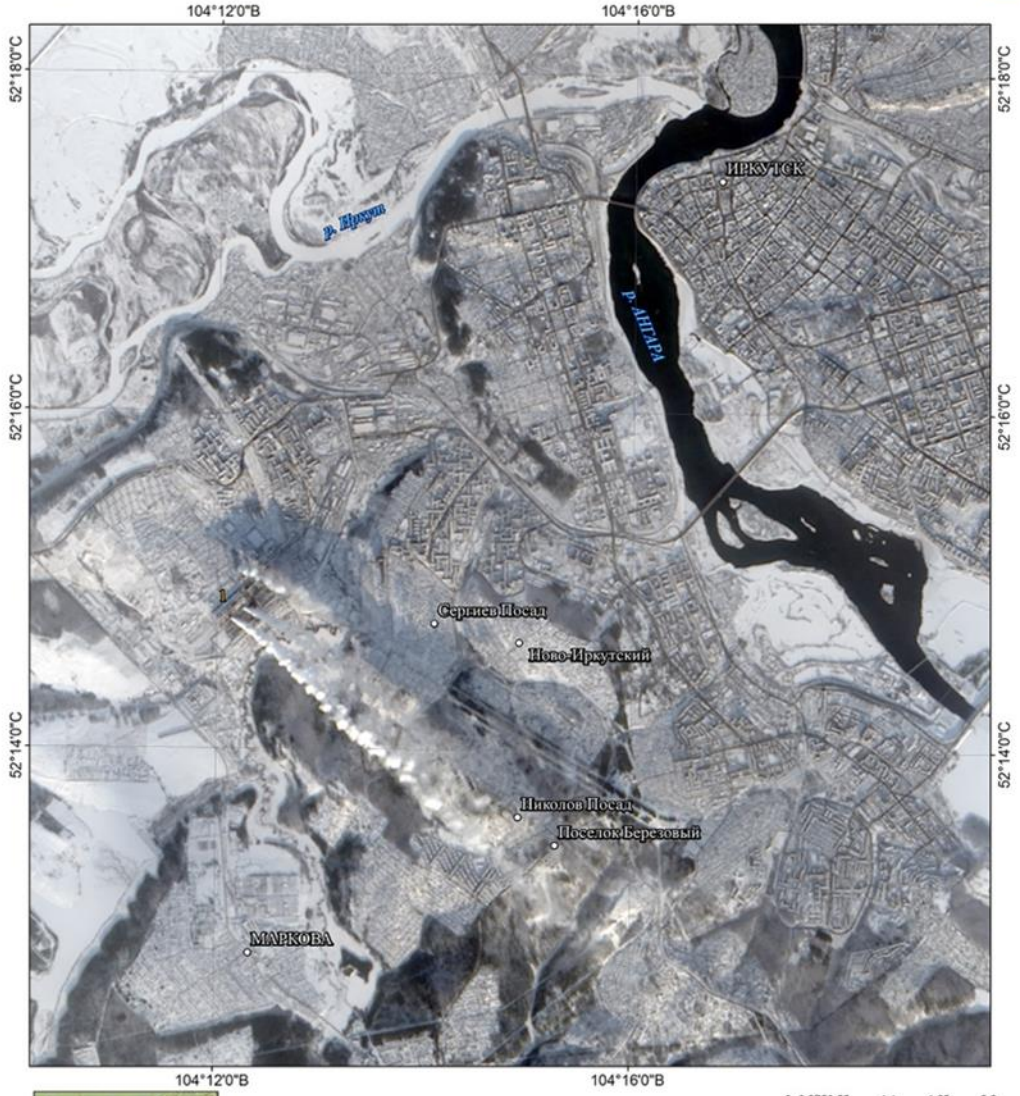
Объектами исследований являются дымовые шлейфы от высотных труб **Ново-Иркутской ТЭЦ, Барнаульской ТЭЦ-3 и Гусиноозёрской ГРЭС**, относящихся к крупным теплоэнергетическим объектам Сибири.

Таблица 1.

Характеристики труб ТЭЦ и исходящих из них дымовых смесей

Название станции	Высота трубы, м	Диаметр устья трубы, м	Скорость выхода дымовых газов, м/с	Температура дымовой смеси, °С
Ново-Иркутская ТЭЦ	250	6,5	33	137
	180	6,0	27	121
Барнаульская ТЭЦ-3	230	7,2	9,6	120
Гусиноозерская ГРЭС	330	12	4,6	156
	190	9	18,6	78

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФГБУ "НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ "ПЛАНЕТА"
СИБИРСКИЙ ЦЕНТР





Сибирский центр
ФГБУ «НИЦ «ПЛАНЕТА»
Россия, 630099, г. Новосибирск
ул. Советская, 30
Тел. (383) 363-46-05
Факс (383) 363-46-05
E-mail: avn@rcpod.ru
http://www.rcpod.ru

Мониторинг загрязнения окружающей среды промышленными объектами

Иркутская область

1 - Ново-Иркутская ТЭЦ

18.01.2019 03:58 UTC

0 0,2750,55 1,1 1,65 2,2 км

USGS science for a changing world

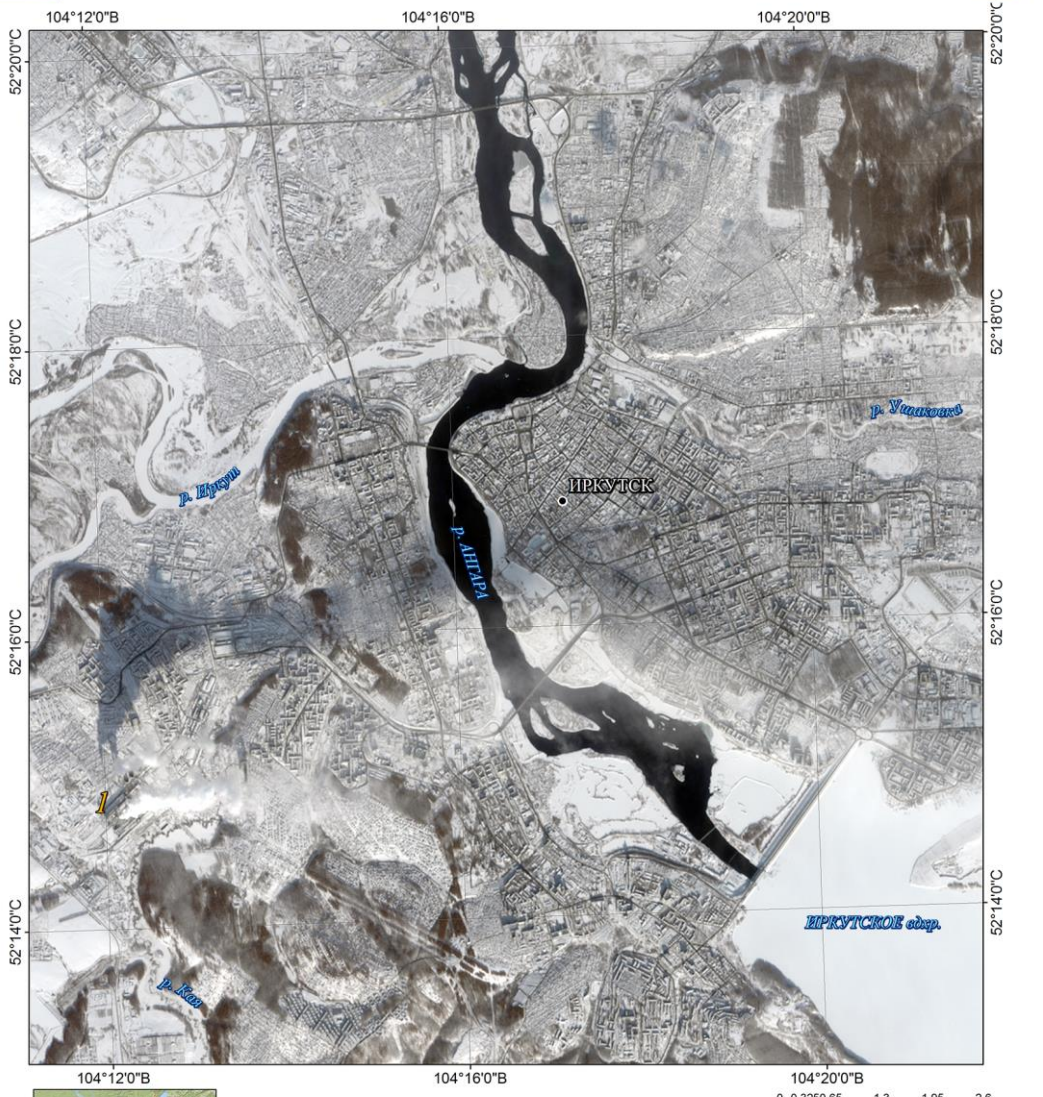
ИСЗ "Landsat-8"

Разрешение 15 м

Спектральные каналы

RGB
0,64 - 0,67 мкм
0,53 - 0,59 мкм
0,45 - 0,51 мкм

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФГБУ "НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ "ПЛАНЕТА"
СИБИРСКИЙ ЦЕНТР





Сибирский центр
ФГБУ «НИЦ «ПЛАНЕТА»
Россия, 630099, г. Новосибирск
ул. Советская, 30
Тел. (383) 363-46-05
Факс (383) 363-46-05
E-mail: avn@rcpod.ru
http://www.rcpod.ru

Мониторинг загрязнения окружающей среды промышленными объектами

Иркутская область

Условные обозначения

1 - ТЭЦ

29.01.2019 04:20 UTC

0 0,3250,65 1,3 1,95 2,6 км

esa

ИСЗ "Sentinel-2A"

Разрешение 10 м

Спектральные каналы

RGB
0,784 - 0,899 мкм
0,650 - 0,680 мкм
0,543 - 0,577 мкм

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФГБУ "НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ "ПЛАНЕТА"
СИБИРСКИЙ ЦЕНТР

ИСЗ "Ресурс-П"№1
(ШМСА-ВР)

Виток № 586
Разрешение 12 м

Спектральные каналы

RGB
0,72 - 0,80 мкм
0,60 - 0,70 мкм
0,51 - 0,58 мкм

Условные обозначения:

1 - Барнаульская ТЭЦ-2

2 - Барнаульская ТЭЦ-3



Сибирский центр
ФГБУ «НИЦ «ПЛАНЕТА»
Россия, 630099, г. Новосибирск
ул. Советская, 30
Тел. (383) 363-46-05
Факс (383) 363-46-05
E-mail: avn@rcpod.ru
http://www.rcpod.ru

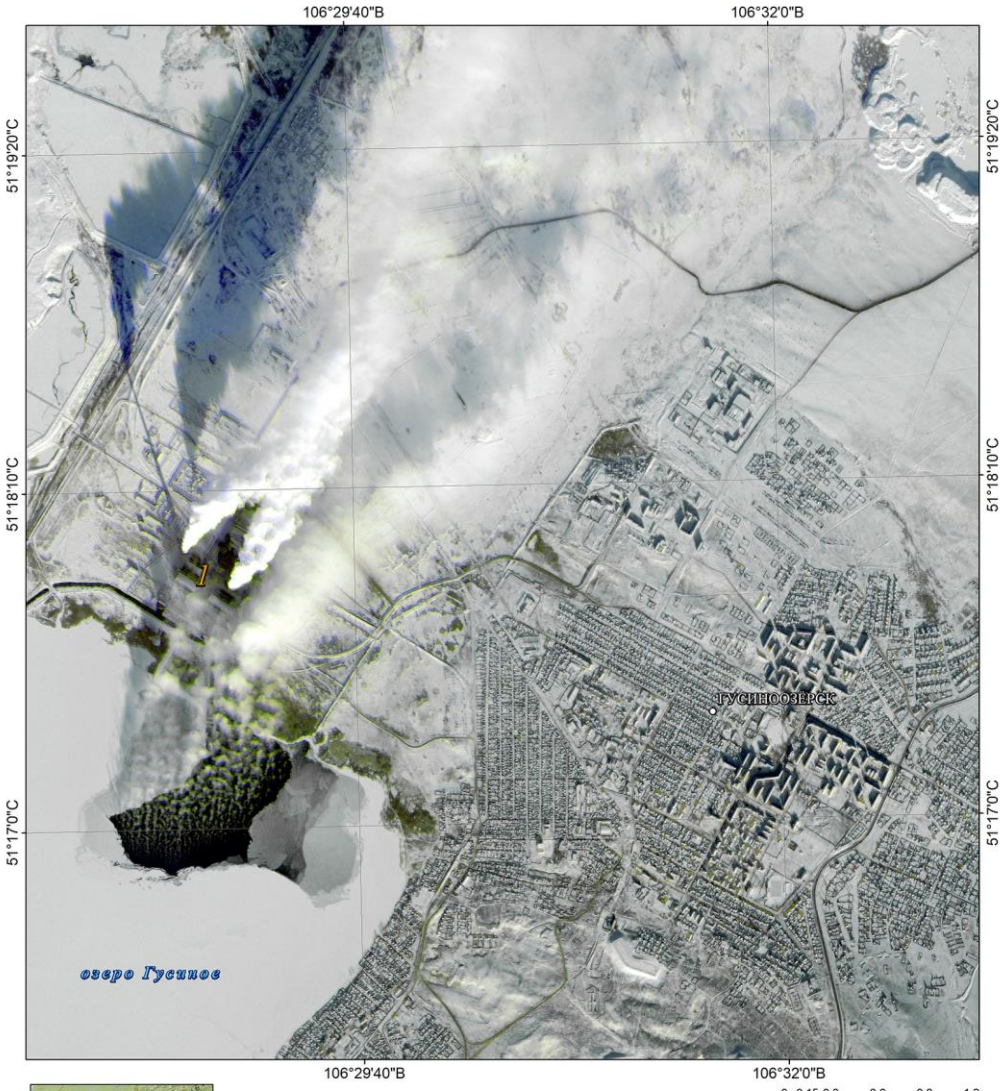
0 0,4 0,8 1,6 2,4 3,2 км



Мониторинг загрязнения окружающей среды промышленными объектами
Алтайский край

02.12.2018 04:07 UTC

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
ФГБУ "НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР КОСМИЧЕСКОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ "ПЛАНЕТА"
СИБИРСКИЙ ЦЕНТР





Сибирский центр
ФГБУ «НИЦ «ПЛАНЕТА»
Россия, 630099, г. Новосибирск
ул. Советская, 30
Тел. (383) 363-46-05
Факс (383) 363-46-05
E-mail: avn@rcpod.ru
http://www.rcpod.ru

Мониторинг загрязнения окружающей среды промышленными объектами

Республика Бурятия

Условные обозначения:

1 - Гусиноозерская ГРЭС

20.12.2018 03:40 UTC

0 0,15 0,3 0,6 0,9 1,2 км

ИСЗ "Канопус-В" №3

Виток № 4890
Разрешение 2,5 м

Спектральные каналы
RGB
0,75 - 0,86 мкм
0,69 - 0,72 мкм
0,63 - 0,69 мкм

Модели для оценивания параметров подъема шлейфа

$$L = \frac{F}{u^3} \quad (1)$$

$$F = g\, w_0\, R^2 \left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right) \quad (2)$$

$$z = B\, x^{2/3} \quad (3)$$

$$B = 2\,\frac{F^{1/3}}{u} \quad (4)$$

F – параметр силы плавучести, (м^4/с^3);

u – средняя скорость ветра в слое распространения примеси, (м/с);

g – ускорение свободного падения, (м/с^2);

w_0 – скорость газовоздушной смеси на выходе из трубы, (м /с);

R – радиус трубы, (м);

T_c – температура смеси, (°K);

T_a – температура окружающего воздуха (°K);

Модель оценивания траектории дымового шлейфа

При отсутствии информации о динамических и тепловых характеристиках дымовых выбросов соотношение (3) с использованием спутниковых снимков дымовых шлейфов ТЭЦ позволяет оценить для конкретного момента времени траектории подъёма. Оценка параметра $\boldsymbol{B}$ проводится на основе (3) и положениям выбранных точек на оси шлейфа методом наименьших квадратов. Значение параметра $\boldsymbol{B}$ определяется, исходя из условия минимума следующего функционала

$$f(B) = \sum_{n=1}^{N} \left[z_n - B\, x_n^{2/3} \right]^2 \qquad (5)$$

где x_n , z_n – измеренные координаты точек на оси дымового шлейфа, $n = 1, \dots, N$.

Модель оценивания скорости подъёма шлейфа

С использованием результатов определения B по (3), (5) и при наличии информации о скорости ветра u в слое распространения дымового шлейфа можно вычислить вертикальную скорость подъёма шлейфа w по следующей формуле

$$w = u\,tg\,\beta \qquad (6)$$

β - угол между касательной к траектории и осью x

В этом случае, дифференцируя (3) по x, получим

$$tg\beta = \frac{2}{3} B\, x^{-\frac{1}{3}} \qquad (7)$$

$$w(x) = \frac{2}{3}\, u\, B\, x^{-\frac{1}{3}} \qquad (8)$$

Отметим, что соотношение (8) является следствием формулы Бриггса (3), описывающей промежуточный подъём шлейфа, и его следует использовать для оценивания скорости w на некоторых удалениях от устья трубы

Оценка начальной скорости выхода дымовых смесей

Согласно (4) значение параметра плавучести $\boldsymbol{F}$ можно найти при наличии оценки параметра $\boldsymbol{B}$ и информации о средней скорости ветра $\boldsymbol{u}$ в слое распространения дымового шлейфа . Тогда с учётом (2), (4) скорость выхода из трубы дымовой смеси $\boldsymbol{w_0}$ находится из соотношения

$$\boldsymbol{w_0 = \left(\frac{B\,u}{2}\right)^3 g^{-1} R^{-2} \Big/ \left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right)} \qquad \textbf{(9)}$$

В случаях больших скоростей ветра обеспечение необходимой величины параметра $\boldsymbol{w_0}$ имеет существенное значение для предотвращения задымления оголовка трубы.

Оценка высот дымовых шлейфов от Ново-Иркутской ТЭЦ

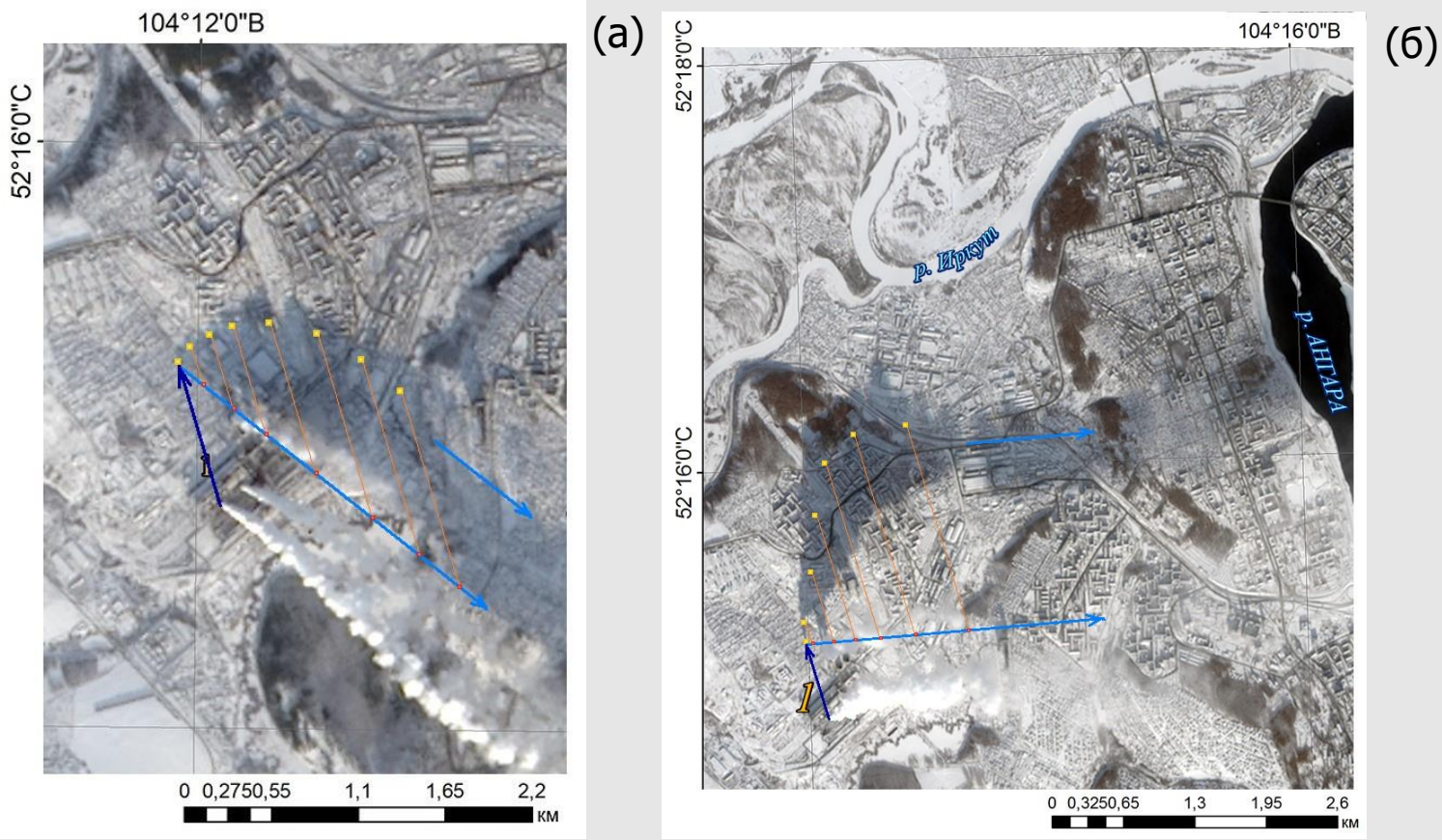


Рис. 1 - Фрагменты спутниковых снимков **Ново-Иркутской ТЭЦ** от 18 января (а) и 29 января 2019 г. (б)

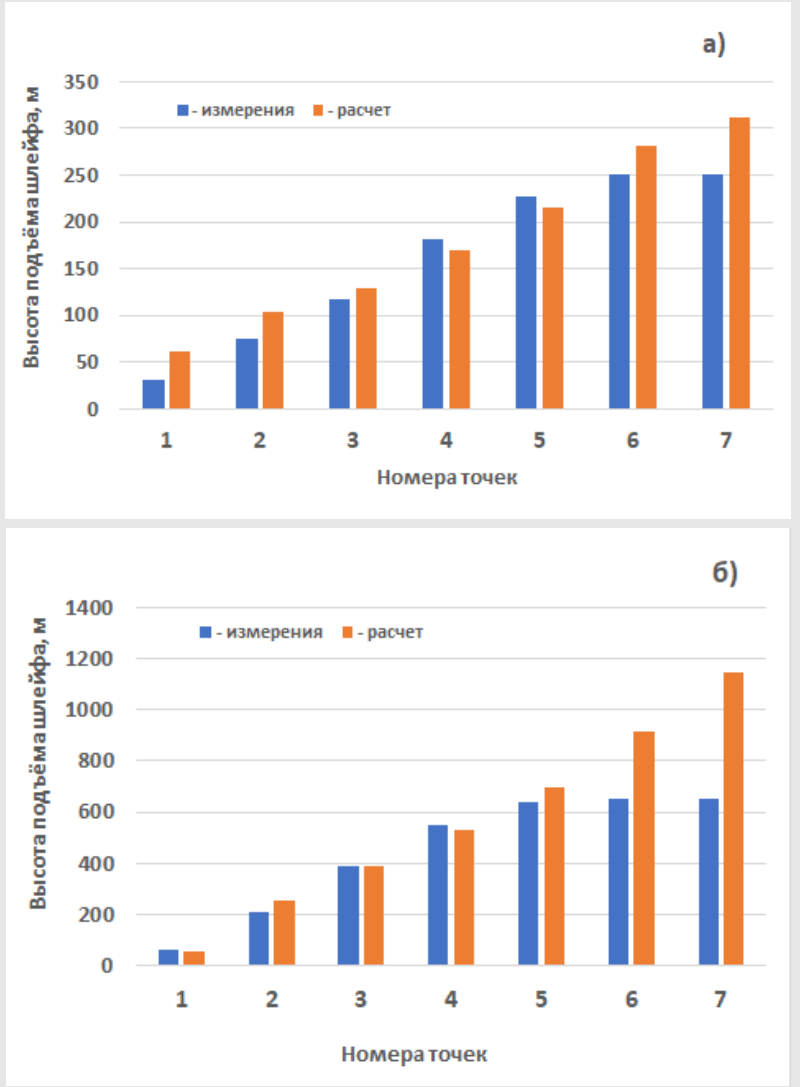


Рис. 2 - Измеренные и рассчитанные по формуле (3) высоты подъёма шлейфов от основной трубы **Ново-Иркутской ТЭЦ** для 18 января 2019 г. (а) и 29 января 2019 г. (б)

Таблица 2.

Метеорологические характеристики в нижней атмосфере по данным аэрологической станции Ангарск (индекс ВМО 30715)

Название станции, дата	Высота над уровнем моря, м	Атмосферное давление, hPa	Температура воздуха, °C	Направление ветра, град.	Скорость ветра, м/с
Ангарск, 18.01.2019 12 UTC	437	981	-10,3	250	1
	658	954	-8,9	295	5,2
	809	936	-10,1	325	8
	903	925	-10,9	325	9
	1548	850	-15,3	315	14
Ангарск, 29.01.2019 12 UTC	437	980	-17,1	75	1
	603	959	-15,7	360	1,9
	635	955	-15,5	345	2,1
	789	936	-16,1	275	3
	880	925	-16,5	280	5
	1512	850	-22,3	285	13

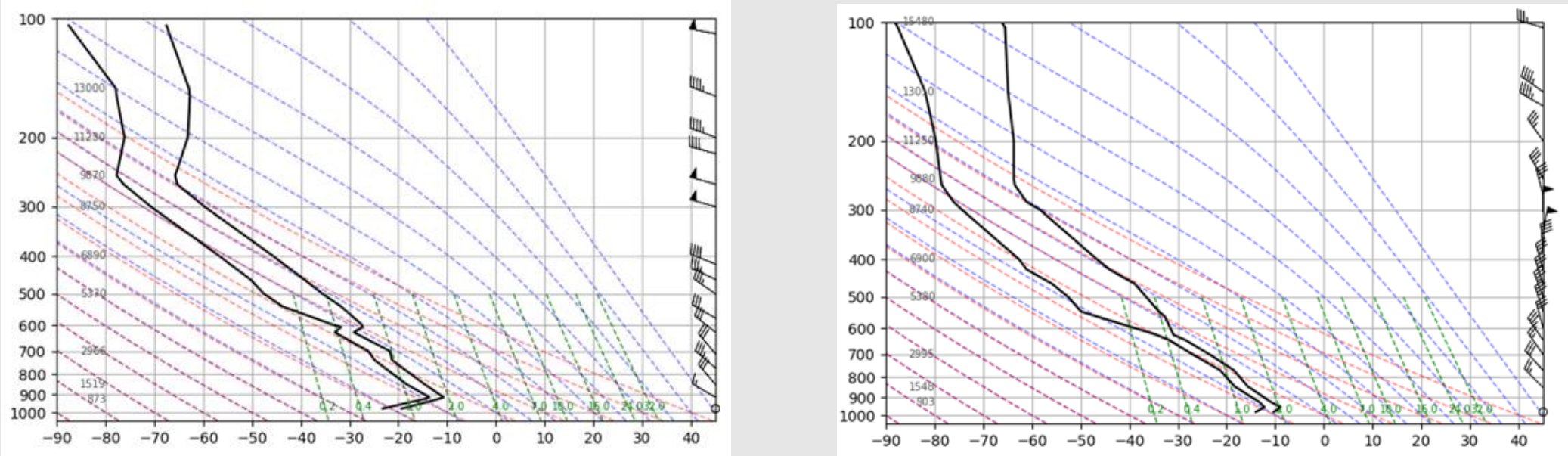
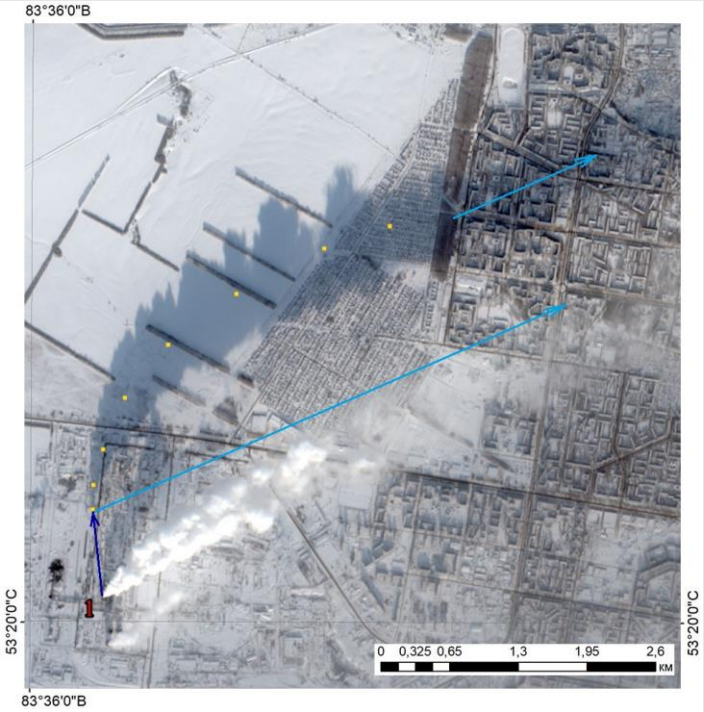
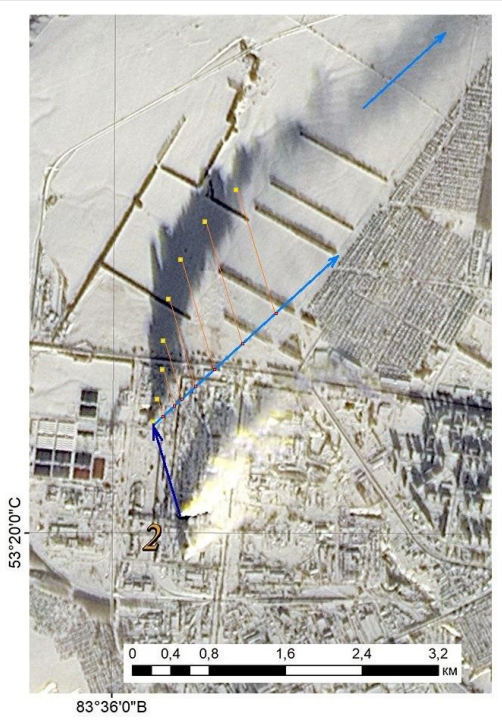


Рис. 3 – Аэрологические диаграммы за 18 января 2019 г. для 00 UTC (а), 12 UTC (б), АС Ангарск (индекс ВМО 30715)

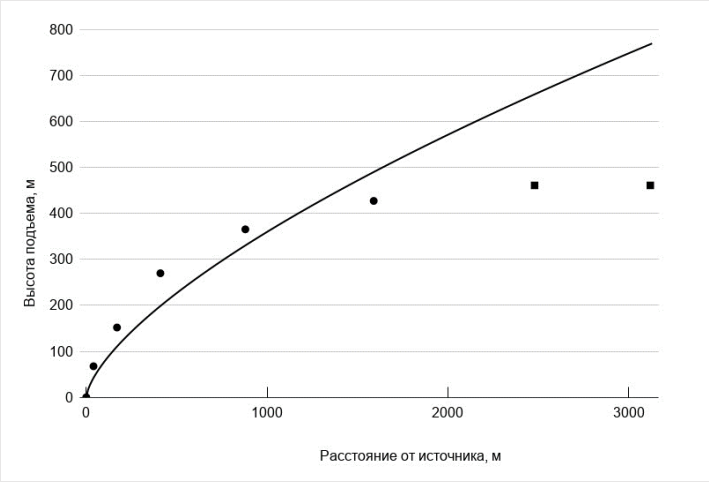


(а)

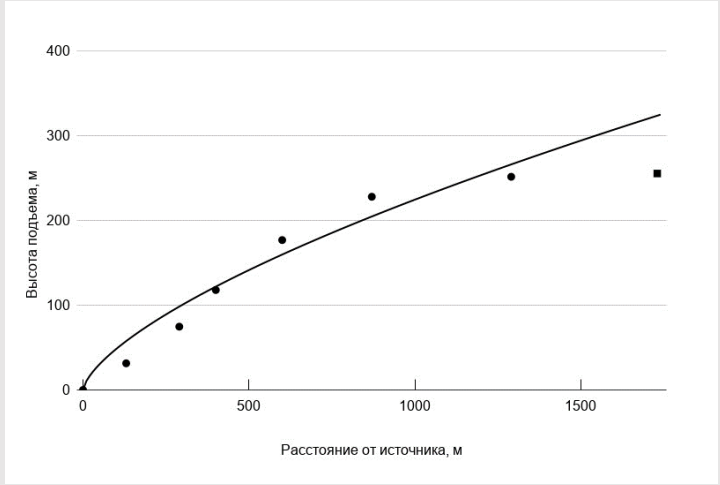


(б)

Рис. 4 - Фрагменты спутниковых снимков **Барнаульской ТЭЦ-3** с ИСЗ «Sentinel-2B» от 19.11.2018 г., 05:41 UTC (а) и ИСЗ «Ресурс-П» № 1 за 02.12.2018 г., 04:07 UTC (б)



(а)



(б)

Рис. 5 - Численно восстановленные по зависимости (3) и спутниковым снимкам от 19 ноября (а) и 2 декабря (б) 2018 г. траектории подъёма дымовых смесей от основной трубы **Барнаульской ТЭЦ-3**

Таблица 3.

Оценки скоростей выхода дымовых струй из труб Ново-Иркутской ТЭЦ и Барнаульской ТЭЦ-3

Название ТЭЦ	Время спутникового снимка	Скорость ветра, м/с	Дополнительная высота подъёма шлейфа, м	Оценка параметра B , м$^{1/3}$	Оценка начальной скорости выхода дымовой струи, м/с	Нормативная скорость выхода струи, м/с
Ново-Иркутская ТЭЦ	18.01.2018 г., 03:58 UTC	9	250	2,4	31,9	33
	29.01.2018 г., 04:20 UTC	3	620	6,9	25,1	33
Барнаульская ТЭЦ-3	19.11.2018 г., 05:41 UTC	4	400	4,02	12,2	9,6
	02.12.2018 г., 04:07 UTC	6	300	2,34	8,2	9,6

Рапута В.Ф., Леженин А.А. Оценка динамических и тепловых характеристик подъёма дымового шлейфа по спутниковой информации // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 07. С. 530–534. DOI: 10.15372/AOO2 0210707

Амикишиева Р.А., Рапута В.Ф., Леженин А.А. Оценивание траекторий подъёма дымовых смесей от высотных труб по спутниковой информации // Вычислительные технологии. 2023. Т. 28, № 6. С. 6-16. DOI:10.25743/ICT.2023.28.6.002

Кузьминых Р.А., Рапута В.Ф., Леженин А.А., Градов В.С. Оценивание скоростей подъёма дымовых шлейфов от труб ТЭЦ по спутниковым снимкам // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38. № 8. С. 252-258. DOI: 10.15372/AOO20250808

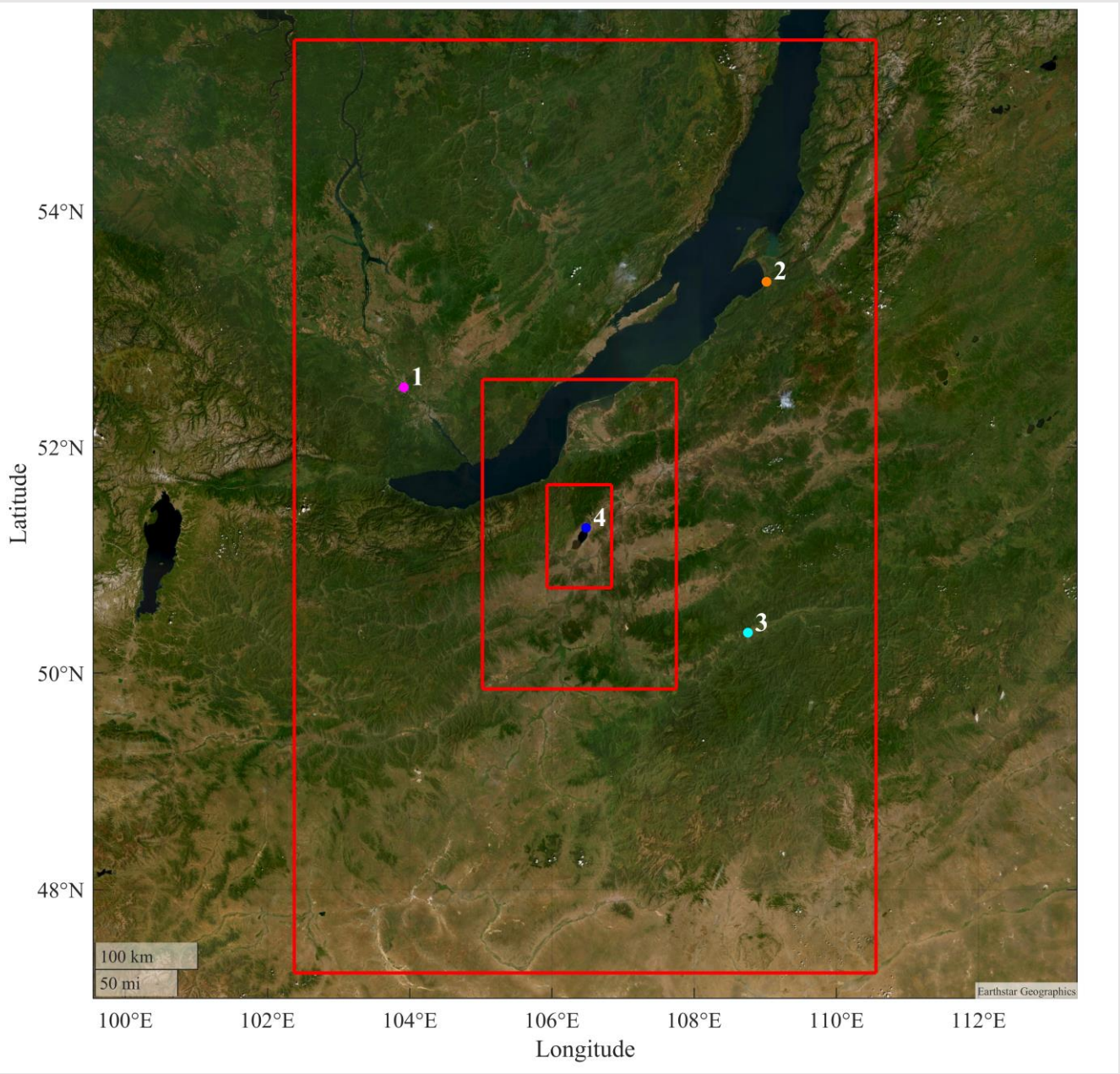
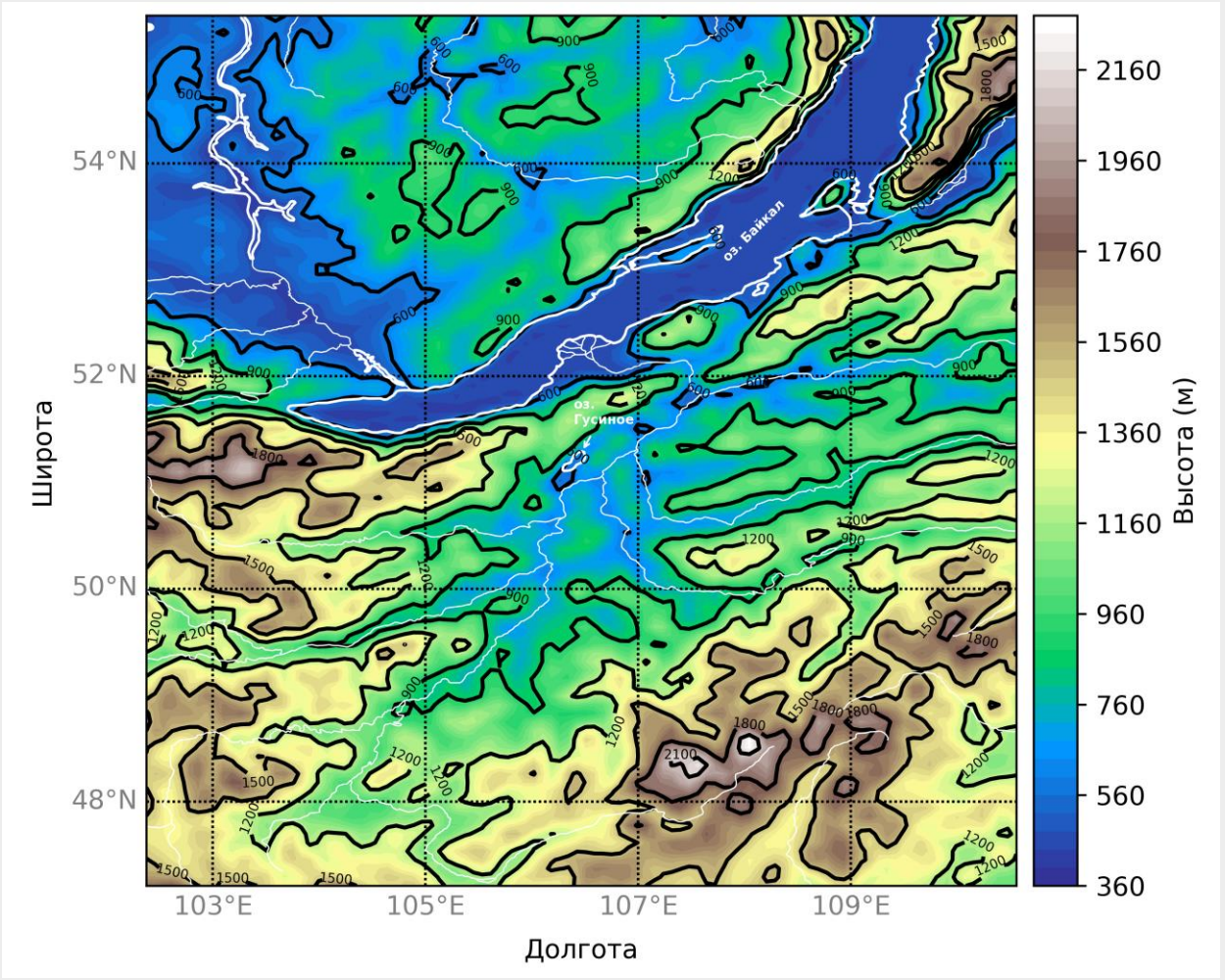


Рис. 6 - Конфигурация вложенных областей модели **WRF** (версия 4.5.1) и расположения ближайших к Гусиноозёрской ГРЭС (4) аэрологических станций: АС Ангарск (1), АС Усть-Баргузин (2), АС Красный Чикой (3)

а)



б)

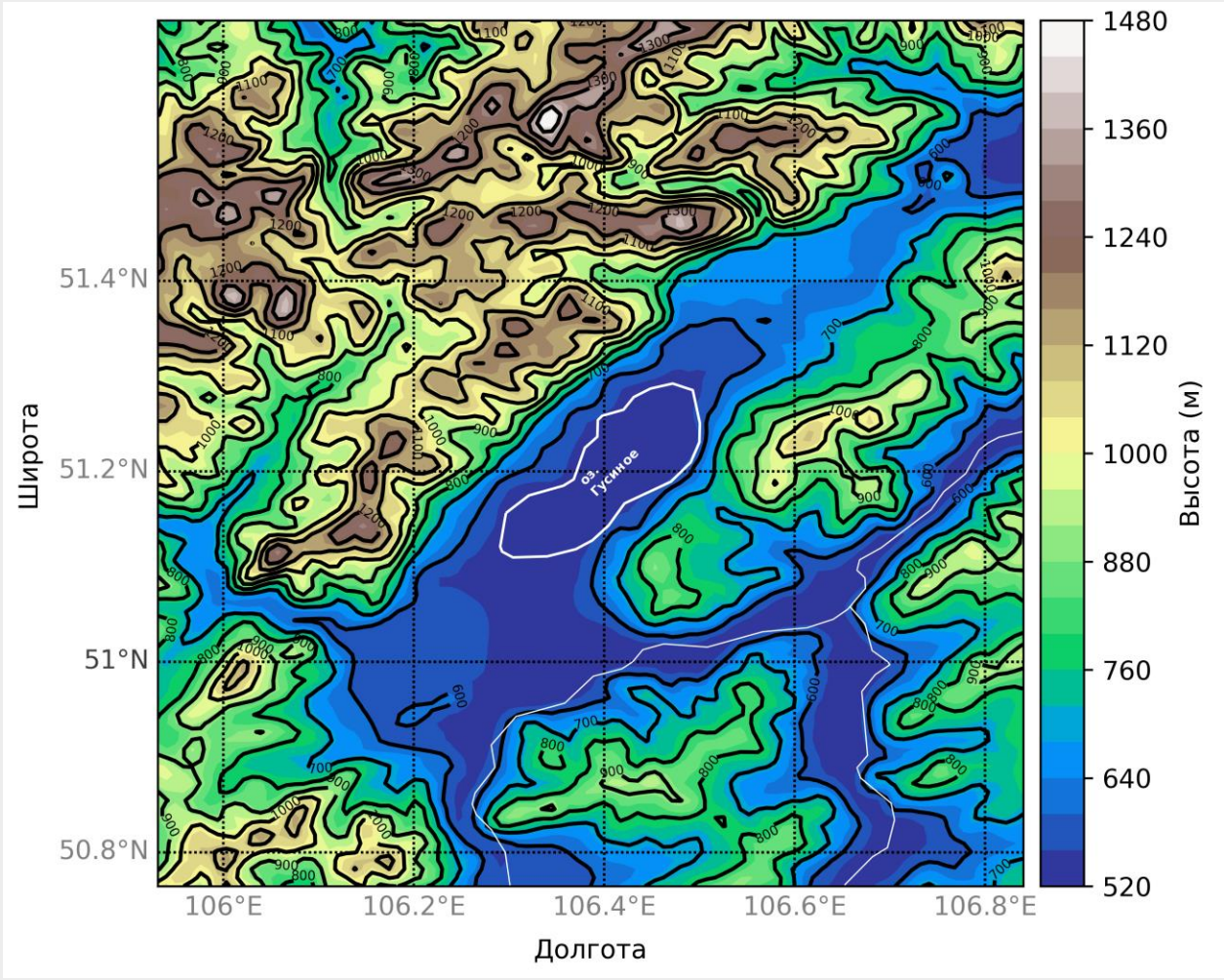


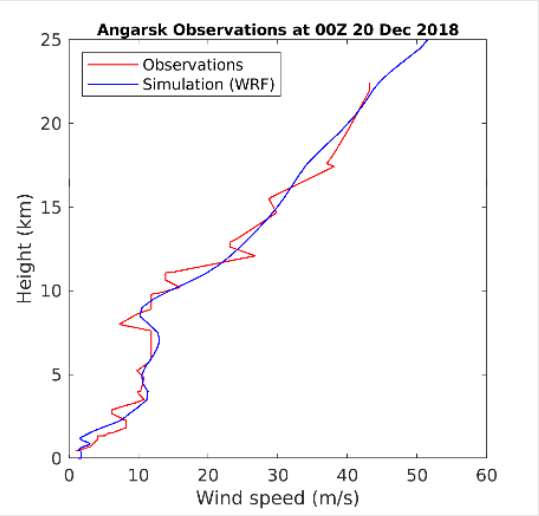
Рис. 7 – Рельеф. **Домен 1** (**а**), **домен 3** (**б**)

Список параметризаций, используемых в модели WRF

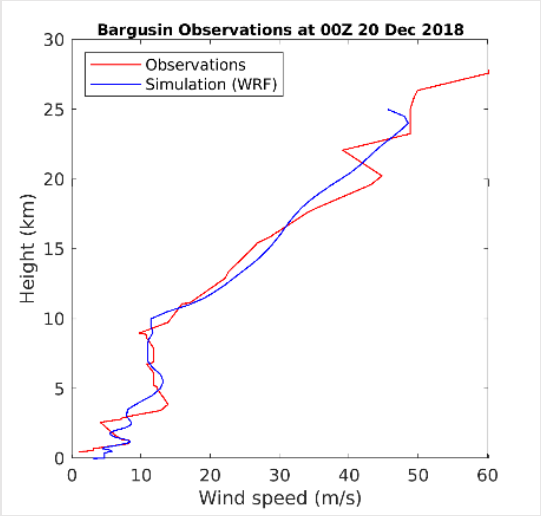
Таблица 4

Параметризация	Название параметризации
Пограничный слой	Схема YSU
Приземный слой	Подобие NOAH
Облачность	Схема Kain-Fritsch
Коротковолновая и длинноволновая радиация	Схема RRTMG
Микрофизические процессы в облаках	Схема Eta (Ferrier)
Подстилающая поверхность	Модель Revised MM5

а)



б)



в)

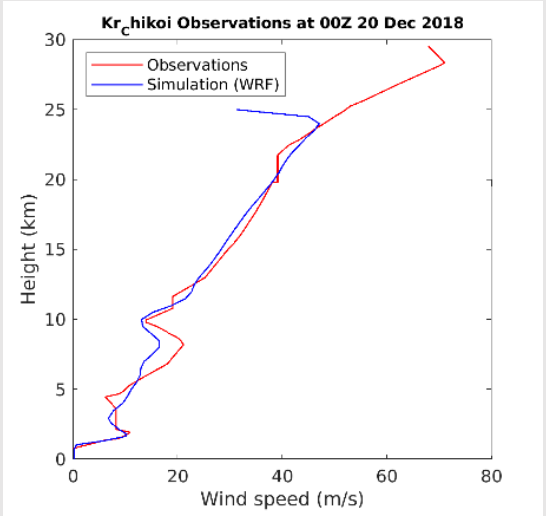
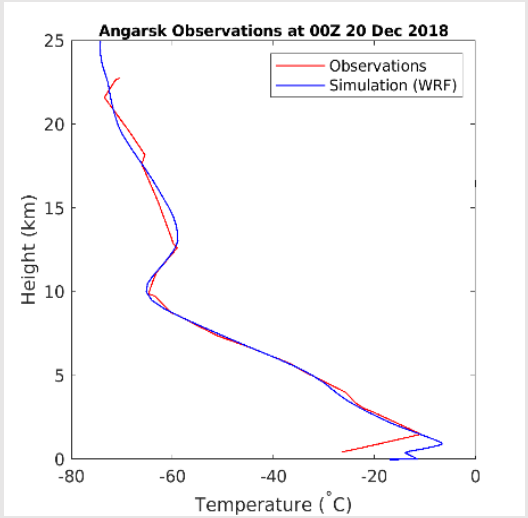
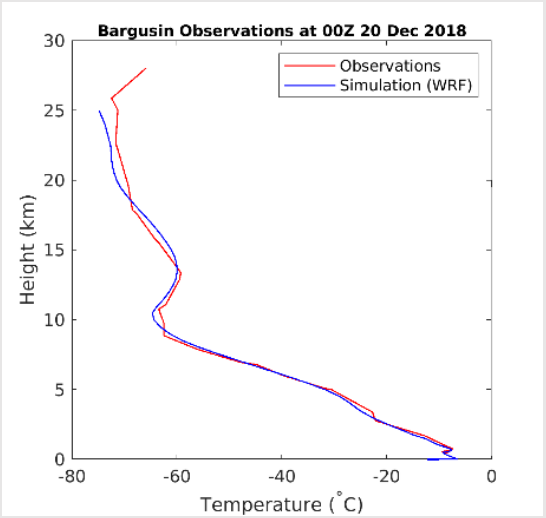


Рис. 8 – Рассчитанные и наблюдаемые **профили модуля скорости ветра** на 00 UTC 20 декабря 2018 г. на АС Ангарск (а), Усть-Баргузин (б), Красный Чикой (в)

а)



б)



в)

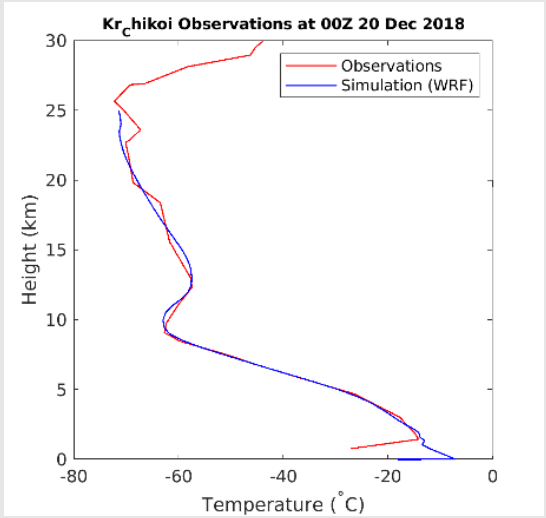
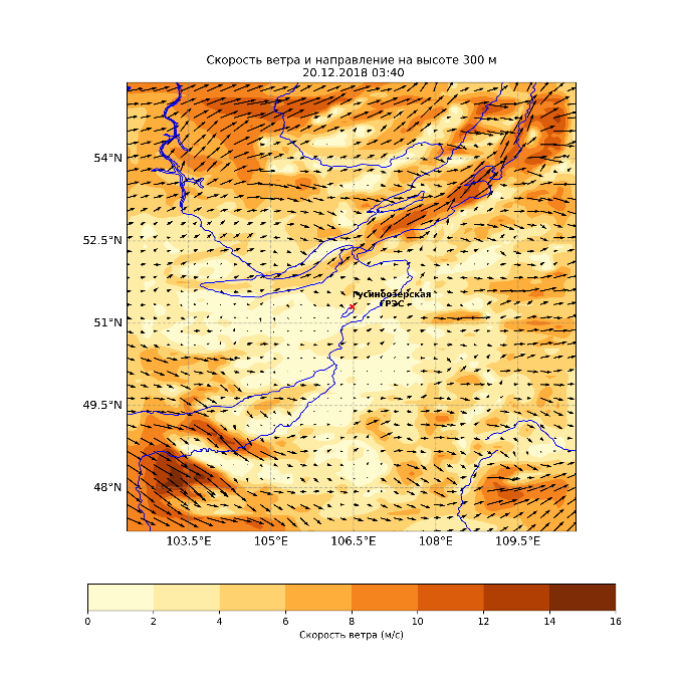
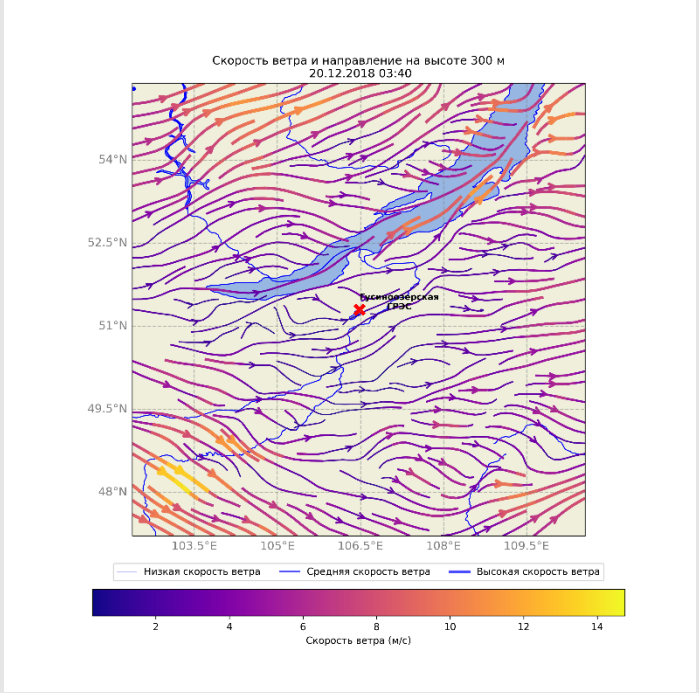


Рис. 9 – Рассчитанные и наблюдаемые **профили температуры** на 00 UTC 20 декабря 2018 г. на АС Ангарск (а), Усть-Баргузин (б), Красный Чикой (в)

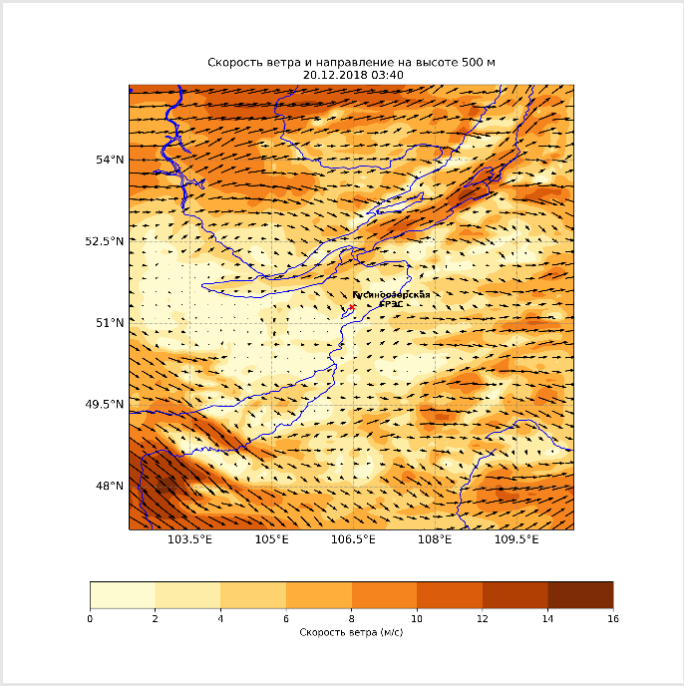
а)



б)



в)



г)

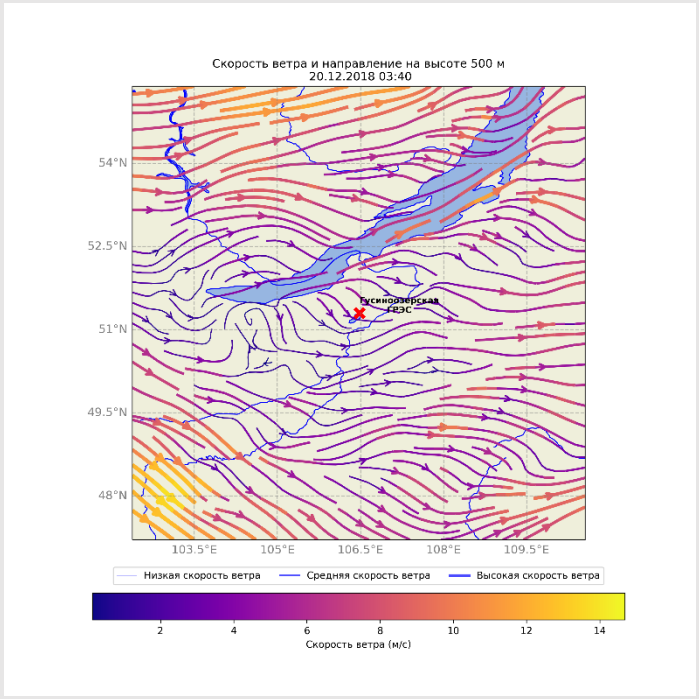
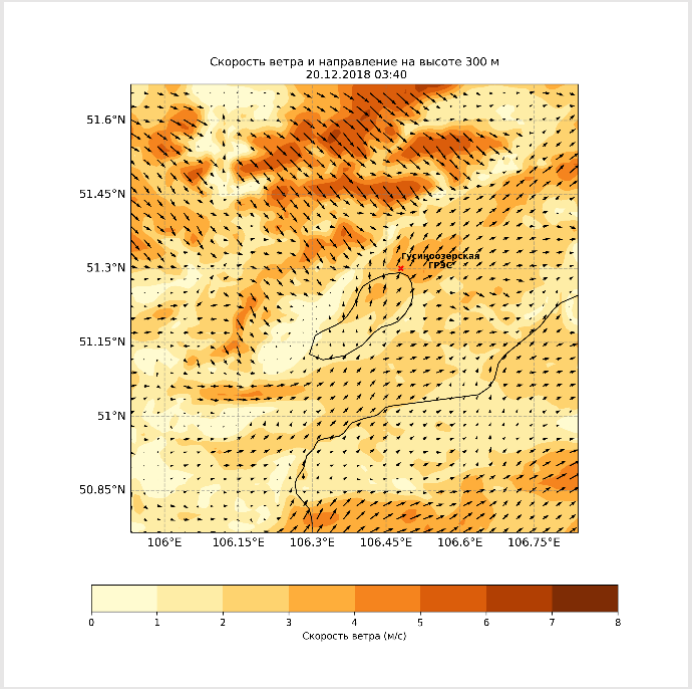
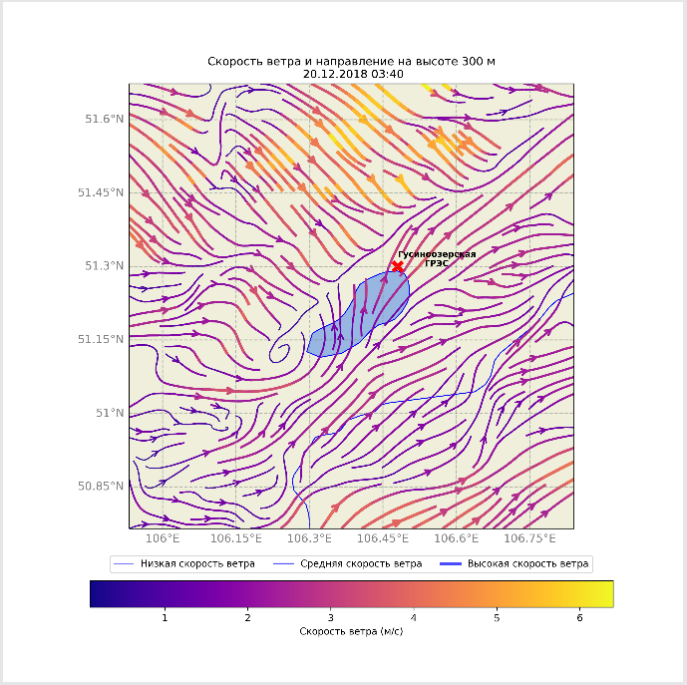


Рис. 10 – Рассчитанные по модели **WRF** поля ветра над территорией БПТ 20 декабря 2018 г. на высотах 300 м (**а, б**) и 500 м (**в, г**) от поверхности земли в области 900x900 км (**домен 1**)

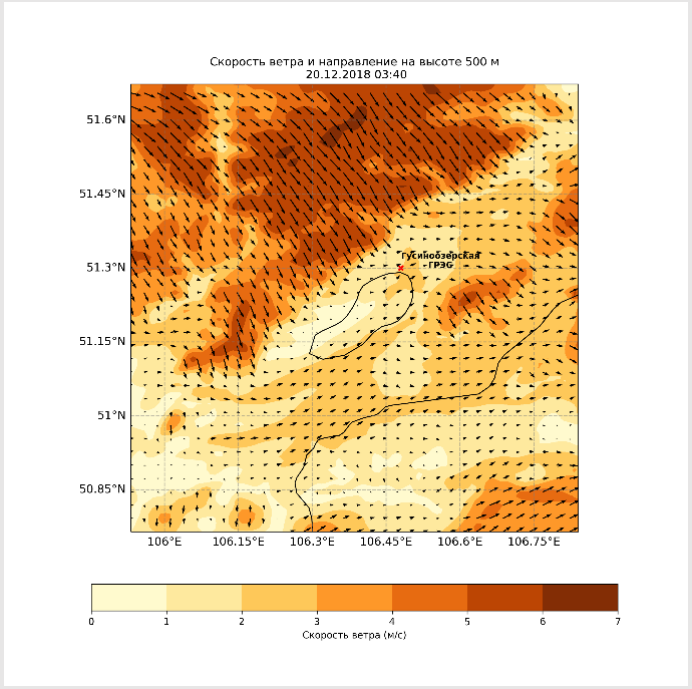
а)



б)



в)



г)

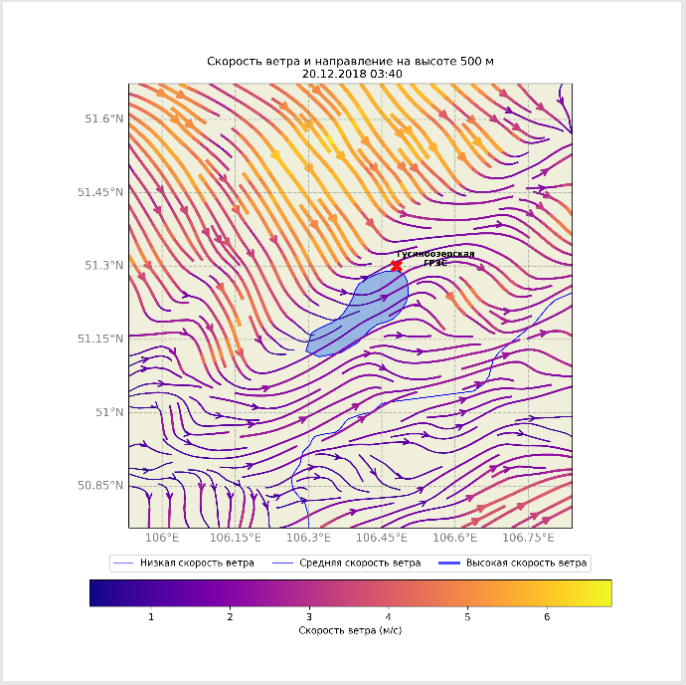


Рис. 11 – Рассчитанные по модели **WRF** поля ветра в районе озера Гусиное 20 декабря 2018 г. на высотах 300 м (**а, б**) и 500 м (**в, г**) от поверхности земли в области 100х100 км (**домен 3**)

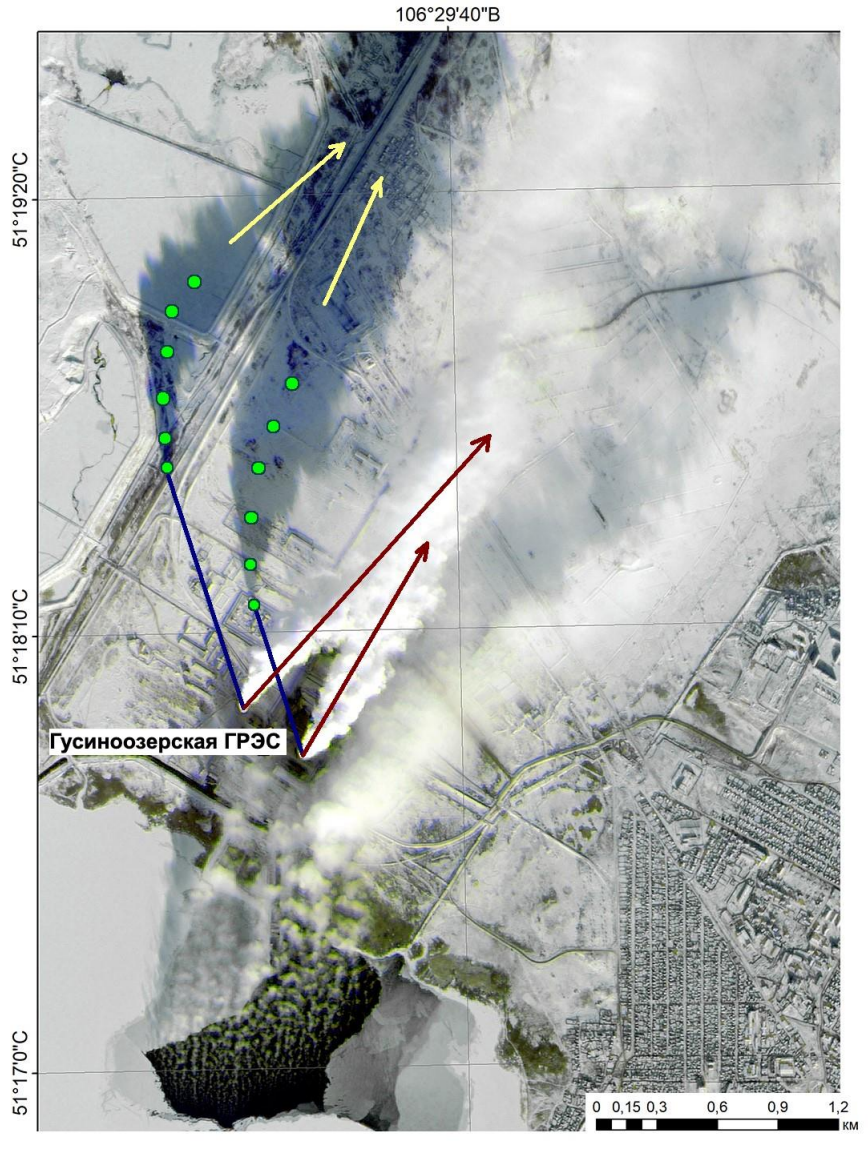
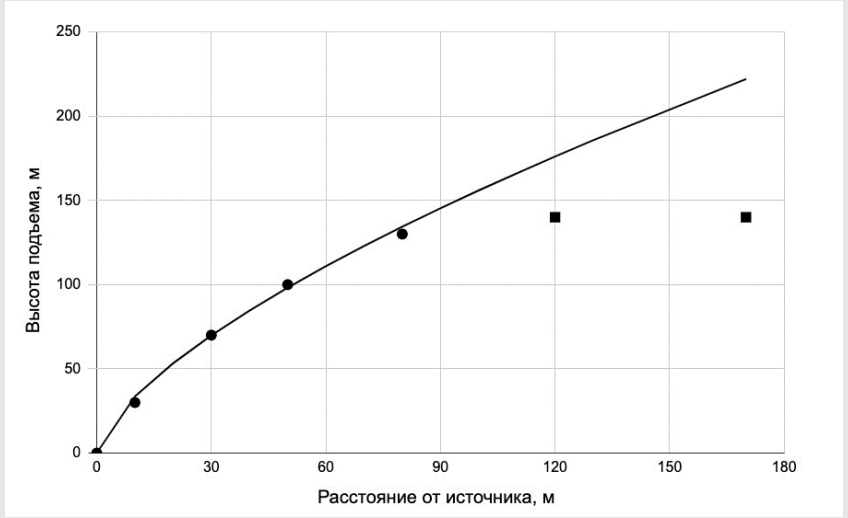


Рис. 12 - Фрагмент спутникового снимка окрестностей Гусиноозёрской ГРЭС с ИСЗ «Конопус-В» № 3 от 20.12.2018 03:40 UTC

(а)



(б)

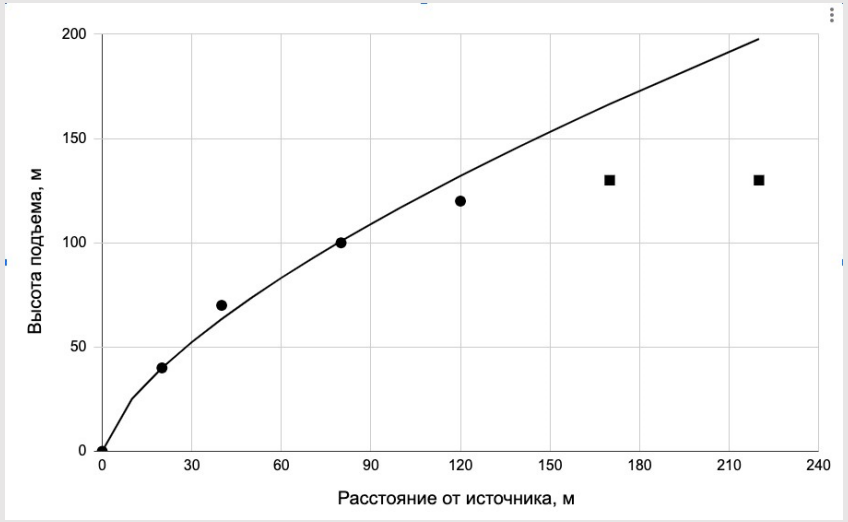


Рис. 13 - Численно восстановленные траектории дымовых шлейфов от 330 метровой (а) и 190 метровой (б) труб **Гусиноозёрской ГРЭС**

Заключение

- С использованием спутниковых снимков дымовых шлейфов, их теневых отображений на земной поверхности предложены модели и методы **численного анализа процессов активной стадии подъёма примесей и их дальнейшего переноса в поле ветра**. Рассмотрение пассивной стадии переноса позволяет определить дополнительную высоту подъёма дымовых смесей от труб тепловых станций. На основе соотношений, вытекающих из теории подобия и размерностей, данных аэрологического зондирования разработаны методы численного восстановления траекторий шлейфов, оценивания начальной скорости выхода из труб дымовых смесей.

- Применительно к дымовым шлейфам от высотных труб **Ново-Иркутской ТЭЦ, Барнаульской ТЭЦ-3** и **Гусиноозёрской ГРЭС** выполнена апробация предложенных методов и подходов. Для проведения исследований использовались зимние спутниковые снимки, обеспечивающие достаточно высокую контрастность теней шлейфов на снежном покрове. Для определённых диапазонов расстояний от труб **ТЭЦ** показан высокий уровень согласия наблюдаемых траекторий с их интерполяциями **в рамках «закона 2/3».**

- Проведение данного исследования представляется актуальным, поскольку трубы **ТЭЦ** относятся к дорогостоящему оборудованию. Внештатные режимы их функционирования могут привести к существенному экологическому и экономическому ущербу. В условиях ограниченности информации о динамических и тепловых характеристиках исходящих дымовых смесей результаты выполненных исследований **могут быть использованы для контроля и оптимизации параметров выбросов при эксплуатации дымовых труб тепловых станций**.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0003.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Контакты:

lezhenin@ommfao.sscc.ru