



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА»

**Исследование и нормирование экологического состояния почв в зоне
деятельности медеплавильного завода (на примере Среднеуральского
медеплавильного завода»)**

Евдокимова М.В., Титарев Р.П., Шестакова
М.В., Аймалетдинов Р.А., Лысенко С.С.

Цель работы: выявить и обосновать допустимый уровень антропогенного воздействия на наземные экосистемы в окрестностях медеплавильного завода по материалам Modis и Sentinel-2 с сервера Vega-science.

Задачи работы:

1. Выявить макрокинетические закономерности внутрисезонной динамики NDVI в окрестностях СУМЗ по данным Modis и Sentinel-2;
2. Выявить макрокинетические закономерности отклика растительности (NDVI) на загрязнение почв комплексом тяжелых металлов в окрестностях СУМЗ по материалам Modis и Sentinel-2;
3. Обосновать ранжирование качества почв по закономерностям отклика растительности на загрязнение почв комплексом тяжелых металлов в окрестностях СУМЗ по двум сенсорам (Modis и Sentinel-2);
4. Составить картосхему устойчивости почв и растительного покрова к загрязнению комплексом тяжелых металлов в зоне воздействия СУМЗ по двум сенсорам (Modis и Sentinel-2).

Объектом настоящего исследования была территория, прилегающая к Среднеуральскому медеплавильному заводу (СУМЗ), расположенному в 50 км на запад от Екатеринбурга в г. Ревда Свердловской области (Рис. 1-2).

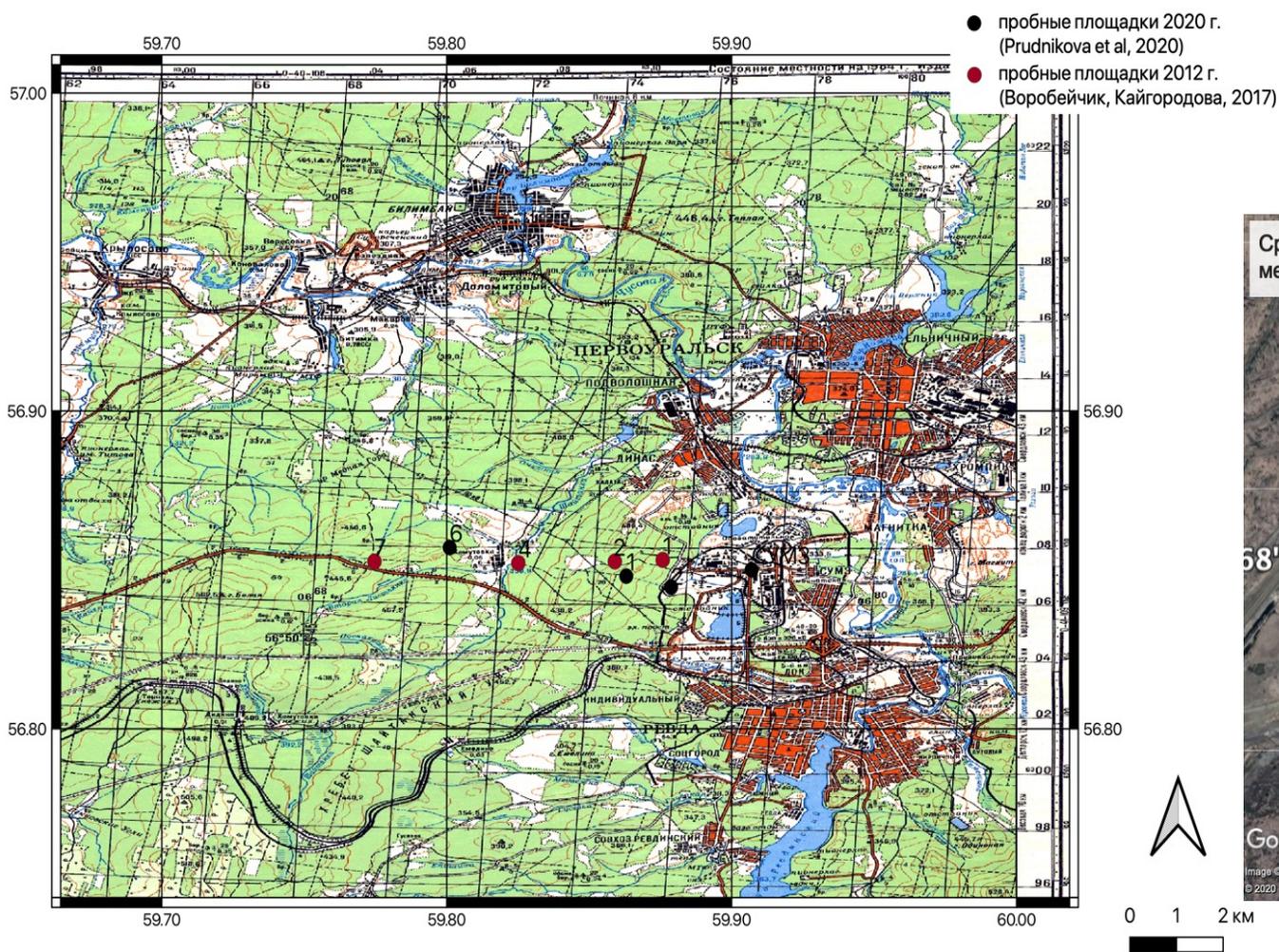


Рис. 1. Топографическая карта окрестностей г. Ревды (растр листа О-40-120 с привязкой в системе координат EPSG:4326 - WGS 84 – Geographic)

Рис. 2. Промышленная зона СУМЗ

В растительном покрове исследуемой территории преобладают широколиственно-темнохвойные леса. (<http://sci-vega.ru/maps/>)

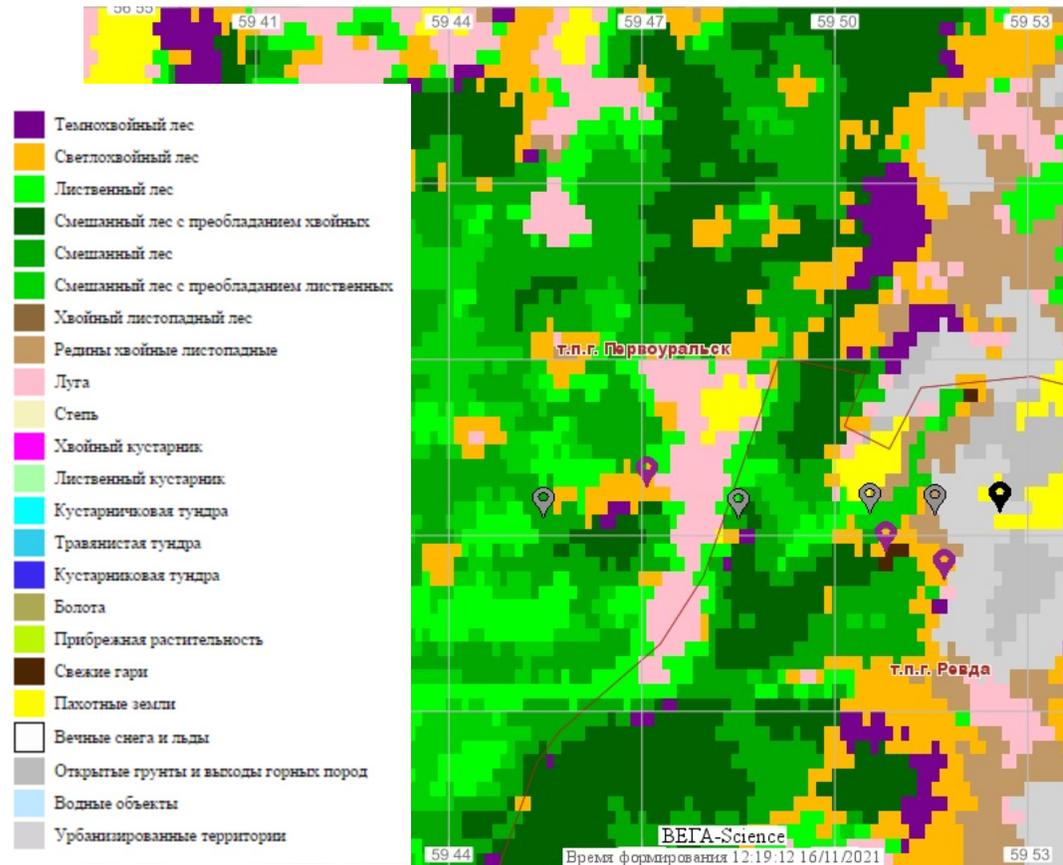


Рис. 3. Карта растительности исследуемой территории

Почвы:

П_{дгг} — Дерново-подзолистые глубокоглееватые и глееватые (в том числе поверхностно-глееватые) преимущественно глубокие
Б_р^г — Буро-таежные (буроземы грубогумусовые) (<https://soil-db.ru/map?lat=56.793&lng=59.8659>)

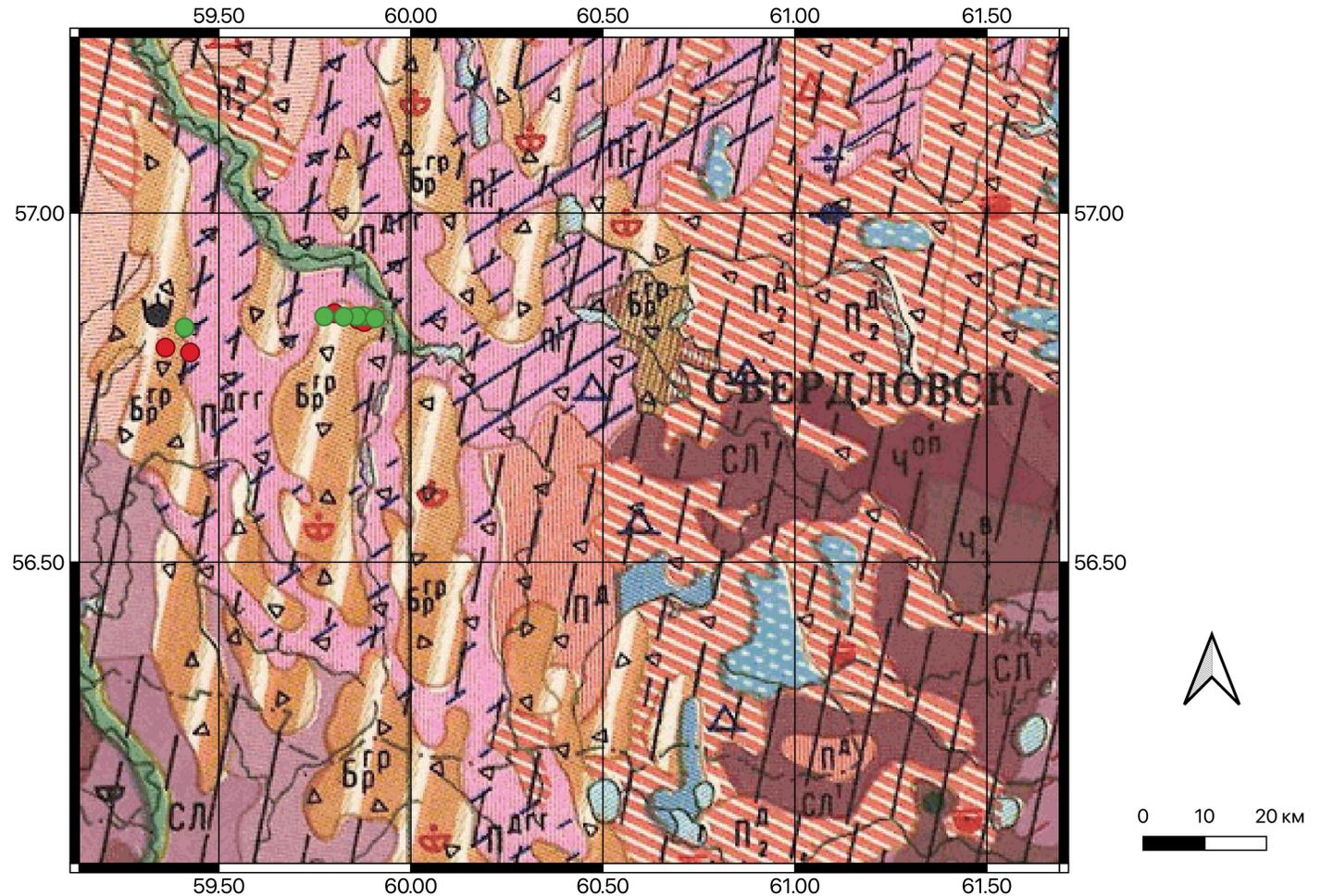
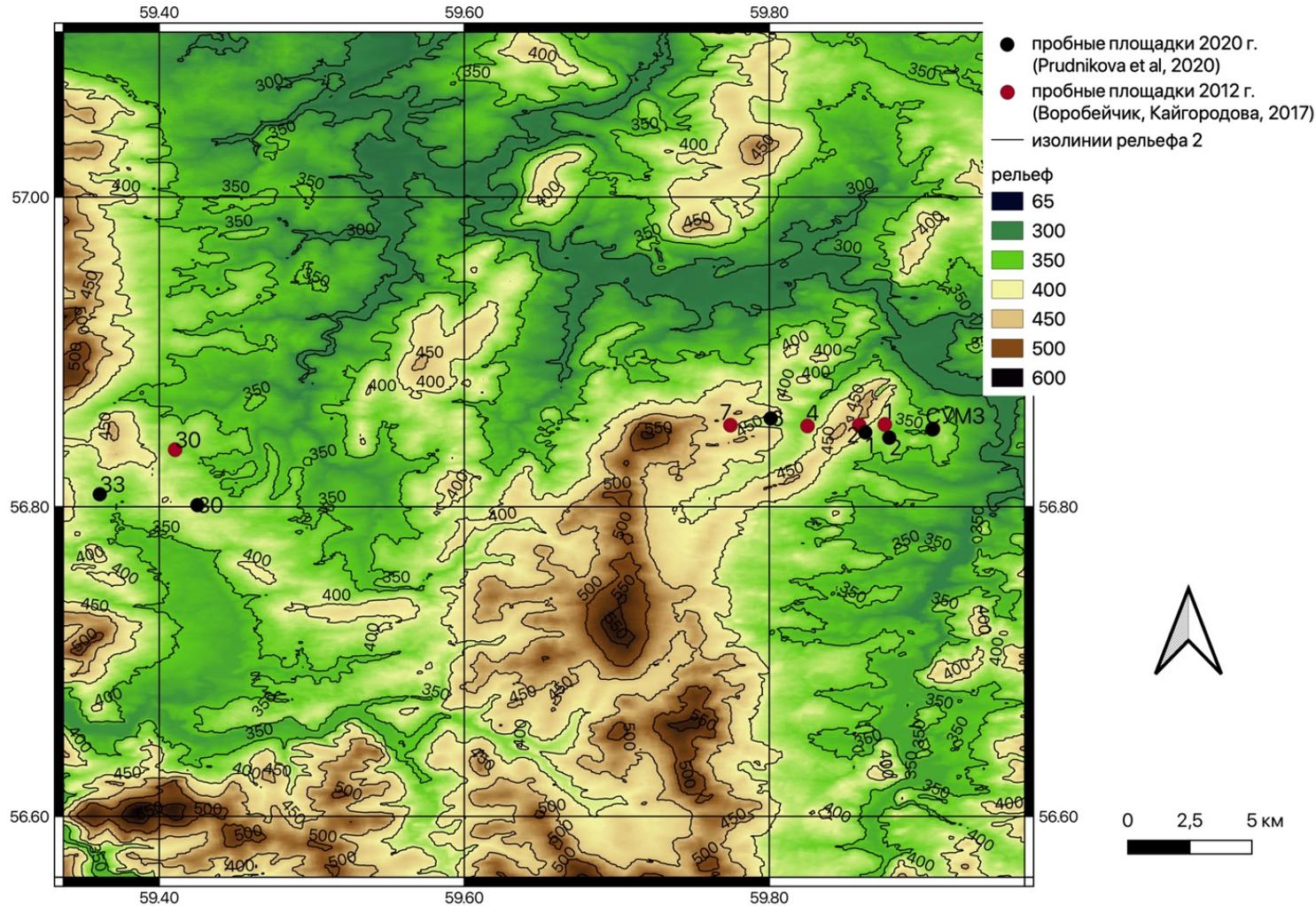


Рис. 4. Почвенная карта исследуемой территории

Город Ревда расположен на территории Ревдинской депрессии. Рельеф характеризуется сильно выраженной расчлененностью (Рис. 5).



Основными компонентами выбросов СУМЗ являются: газообразные соединения серы, фтора, азота; пылевые частицы с сорбированными тяжелыми металлами (Cu, Pb, Zn, Cd, Fe, Hg и др.) и металлоидами (As) (Воробейчик, Кайгородова, 2017). Преимущественными являются западные ветра. Загрязняющие вещества, поступающие с медеплавильного завода, преимущественно разносятся ветром в восточном направлении.



Рис. 5. Карта высот исследуемой территории по данным SRTM

Экспериментальные данные о содержании тяжелых металлов в гумусовом горизонте почв взяты из работ Воробейчика и Кайгородовой (2017) (Табл. 2) и Prudnikova et al (Табл. 3).

2012 г.

Таблица 2. Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в гумусовом горизонте почвы в разных зонах нагрузки (Воробейчик, Кайгородова, 2017)

Гумусовый горизонт (АУ), 2012 год					
	фоновая (30 км)	буферная (7 км)	буферная (4 км)	импактная (2 км)	импактная (1 км)
Cu	52,2	424,0	367,0	1040,0	1080,0
Pb	65,9	215,0	135,0	317,0	379,0
Cd	1,2	5,7	2,3	5,8	4,8
Zn	80,0	257,0	108,0	203,0	185,0
z*	24,0	108,0	59,2	140,0	138,0

2020 г.

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в гумусовом горизонте почвы в разных зонах нагрузки (Prudnikova et al, 2020)

Гумусовый горизонт (АУ), 2020 год					
	фоновая (33 км)	фоновая (30 км)	буферная (6 км)	импактная (2 км)	импактная (1 км)
Cu	57,7	71,5	1560,0	4560,0	3370,0
Pb	69,3	81,0	878,0	4300,0	2450,0
Cd	1,7	2,5	16,0	40,3	23,3
Zn	198,0	190,0	1150,0	2080,0	1470,0
z*	33,9	40,5	399,0	1130,0	729,0

z* - рассчитанное нами среднее геометрическое из концентрации в почве 4 тяжелых металлов (Cu, Pb, Cd, Zn).

Методы исследования

Мерой воздействия поллютанта послужил показатель дозы стрессора в форме среднего геометрического из валовых концентраций в почве четырёх тяжёлых металлов (Cu, Zn, Pb и Cd). В качестве показателя отклика растительного покрова выбрали меру количества фитомассы на пробных площадках, характеризуемую значениями вегетационного индекса NDVI. Каждой пробной площадке был поставлен в соответствие один пиксел. Значения вегетационного индекса NDVI находили по материалам Modis для 2012 года и Sentinel – 2 для 2020 года. Источником данных послужил сервер Вега-science (<http://sci-vega.ru/>).

Временную динамику наземной фитомассы, мерой которой послужил вегетационный индекс NDVI, моделировали с использованием решения, полученного в работе Гендугова и Глазунова (2014):

$$q = \lambda e^{-k/t} t^{-B}. \quad (2)$$

В этом уравнении q - концентрация фотосинтетически активной биомассы; t – время; λ – масштабирующий коэффициент; k – коэффициент скорости увеличения концентрации фотосинтетически активной биомассы в течение вегетационного сезона в результате ее роста и B – коэффициент скорости убывания концентрации фотосинтетически активной биомассы в результате отмирания (и рост и отмирание идут одновременно с разными, изменяющимися с течением времени, скоростями).

Макрокинетические характеристики в пространственном распределении значений NDVI в зоне воздействия комбината для опорных точек, обеспеченных многолетними наземными измерениями (Воробейчик, Кайгородова, 2017; Prudnikova, 2020), определяли в рамках модели (Гендугов, Глазунов, 2014):

$$q = \Lambda e^{-K/z} z^{-B}. \quad (3)$$

В этом уравнении Λ – масштабирующий коэффициент; K – коэффициент «скорости» увеличения концентрации фотосинтетически активной биомассы в результате увеличения концентрации тяжелых металлов z ; B – коэффициент «скорости» убывания концентрации фотосинтетически активной биомассы в ответ на увеличение концентрации тяжелых металлов z . Поскольку максимальное значение NDVI достигается при концентрации z_4 , эта величина выбрана пороговой концентрацией.

Значения коэффициентов уравнений (2) и (3) находили подгонкой по способу наименьших квадратов с использованием созданного на языке программирования Python 3 алгоритма на основе примеров J. Phillips (Zunzuncode/pyeq3, 2020) и библиотек SciPy, NumPy, Pyeq3 и Matplotlib.

С использованием пакета программ компьютерной алгебры Maxima и полученных указанным способом коэффициентов моделей (2) и (3) анализом производной первого, второго и третьего порядка по t и z находили особые точки моделей, разделяющие кривые отклика на интервалы, характеризующие сходством макроскопической кинетики.

Оценку степени сходства факторов, определяемых рельефом, для опорных точек на территории проводили по материалам радарной съёмки SRTM с использованием QGIS 3.16. Анализ растровых карт *NDVI* по данным MODIS (интерполированные семидневные) из источника Вега-Science и подготовку картографических материалов проводили в QGIS 3.16.

Пересчет границ воздействия в других направлениях от завода провели по опорному азимуту – западному по формуле (Гендугов, Глазунов, 2007):

$$l = m \left(\frac{a}{b} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

где l - протяженность зоны воздействия в направлении данного румба; m – коэффициент пересчета, равный протяженности зоны воздействия по западному румбу; a – доля ветра, создавшего границу воздействия по данному румбу; b - доля ветра восточного направления.

Результаты и обсуждения

Результаты анализа особенностей рельефа по материалам радарной съёмки SRTM (Рис. 5, 6, 7) свидетельствуют о том, что все пробные площадки располагаются на склоновых землях или на плоских равнинных территориях разной экспозиции с крутизной склонов менее 5 градусов в транзитных (по линиям поверхностного стока) местоположениях, что позволяет в первом приближении пренебречь этими различиями и объединить их в одну категорию по инсоляции и гидрологии. Различия между пробными площадками в их высотных отметках (Рис. 5) также оказались пренебрежимо малыми по их потенциальному вкладу в различие температур за счёт различий в высоте над уровнем моря.

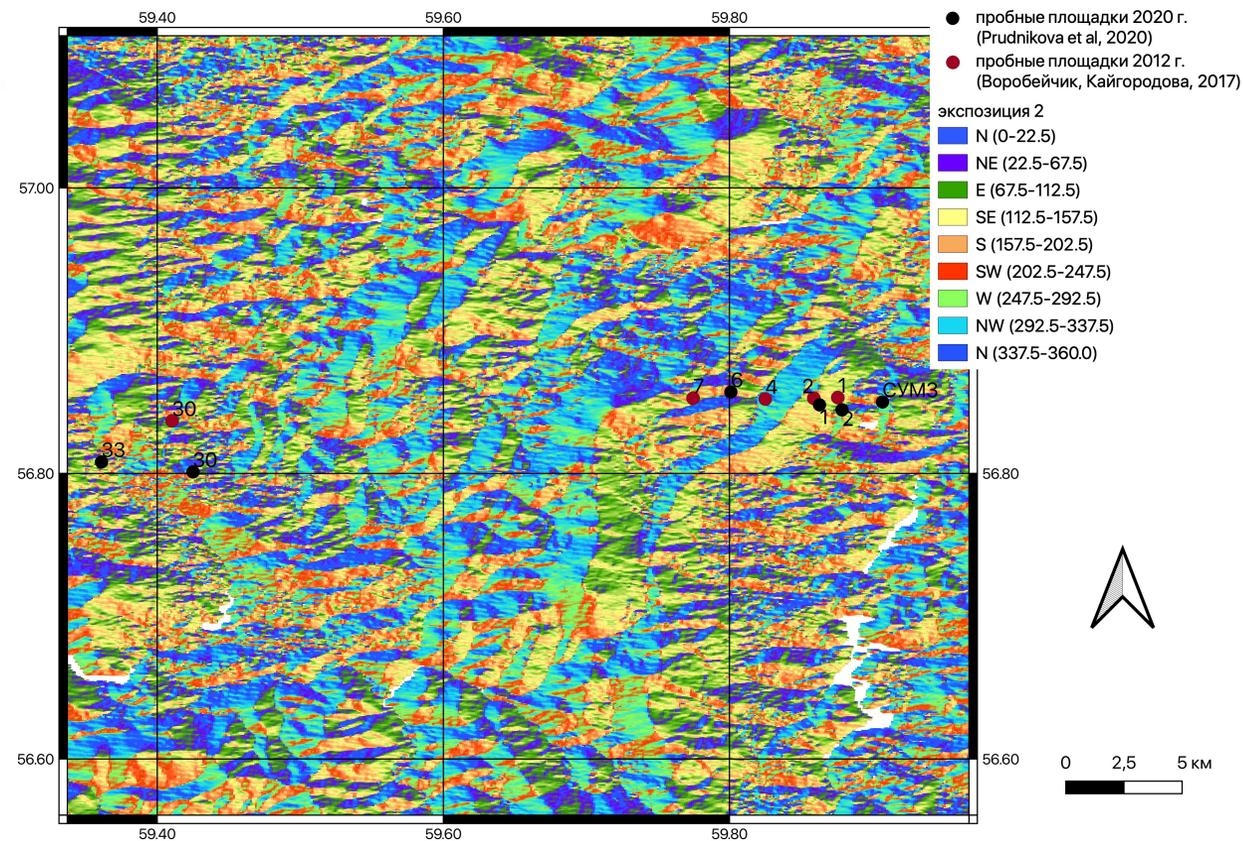
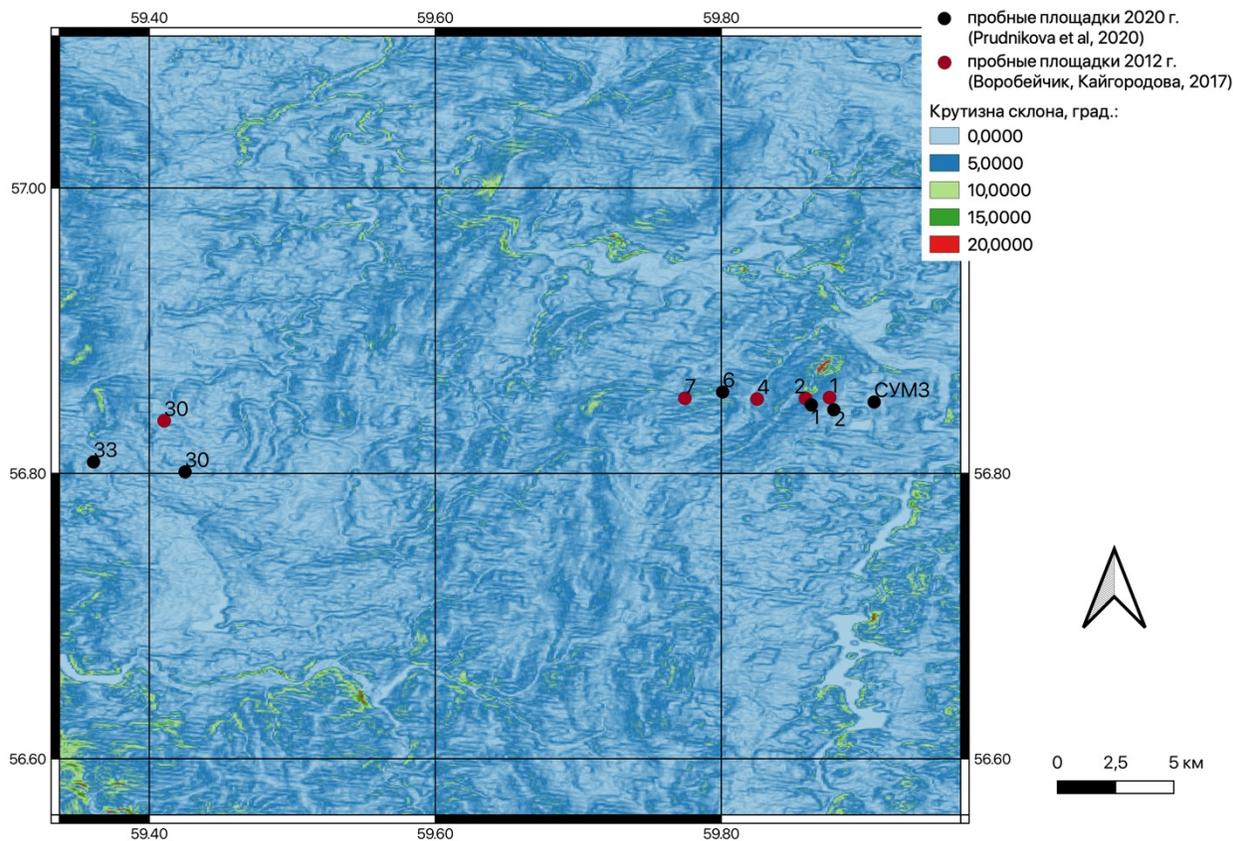
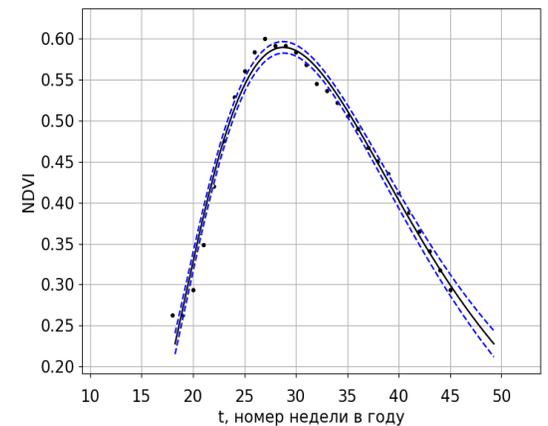


Рис. 6. Карта уклонов местности по материалам SRTM

Рис. 7. Карта экспозиции склонов по материалам SRTM

Таблица 4. Параметры и особые точки модели (2) сезонной динамики вегетационного индекса NDVI 2012 г. для мониторинговых площадок в окрестностях СУМЗ

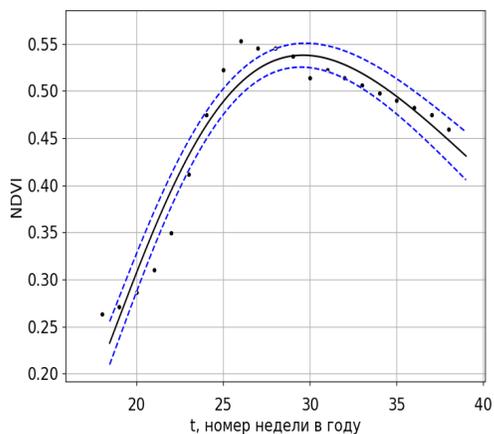
Расстояние, км	λ	B	k	t_4	q_4
1	7,37E+11	6,37	1,89E+02	30	0,54
2	8,86E+11	6,30	1,87E+02	30	0,87
4	8,10E+07	4,27	1,16E+02	27	0,85
7	2,16E+09	4,96	1,42E+02	29	0,88
30	4,05E+14	7,84	2,26E+02	29	0,59



Фоновая территория (30 км)

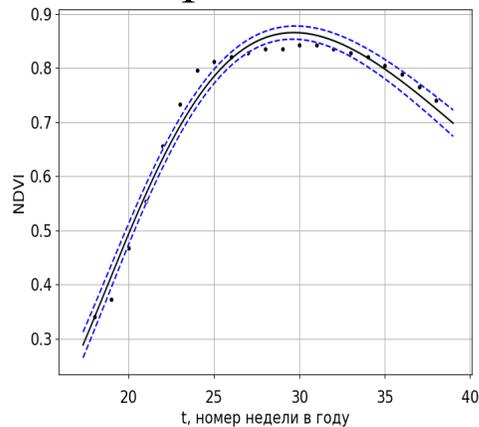
R-squared: 0,98

Сезонная динамика NDVI на мониторинговых площадках в окрестностях СУМЗ в 2012 г.:



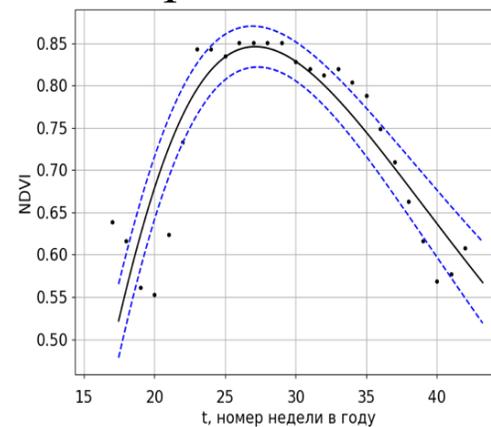
Импактная зона (1 км)

R-squared: 0,98



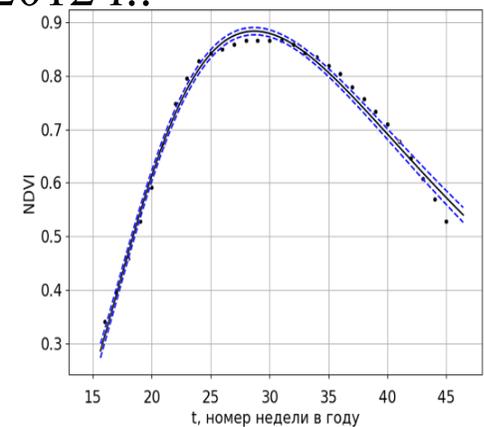
Импактная зона (2 км)

R-squared: 0,97



Буферная зона (4 км)

R-squared: 0,76

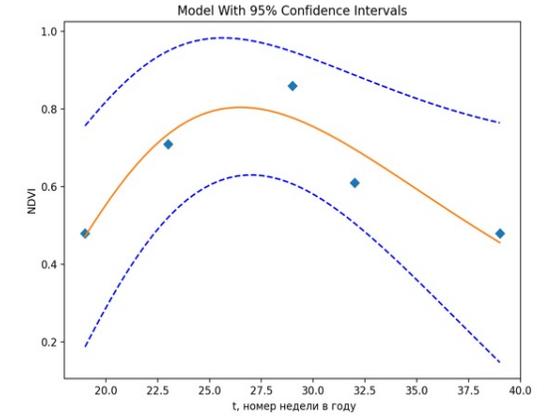


Буферная зона (7 км)

R-squared: 0,99

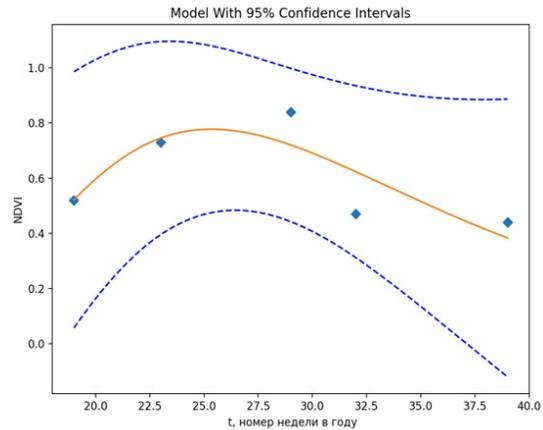
Таблица 5. Параметры и особые точки модели (2) **сезонной динамики вегетационного индекса NDVI 2020**
Г. для мониторинговых площадок в окрестностях СУМЗ

Расстояние, км	λ	B	k	t_4	q_4
1	8,72E+15	8,73E+00	2,21E+02	25	0,78
2	2,69E+04	2,54E+00	6,61E+01	26	0,54
6	8,25E+16	9,19E+00	2,48E+02	27	0,59
30	4,05E+19	1,06E+01	2,83E+02	27	0,87
33	7,68E+15	8,60E+00	2,28E+02	27	0,80



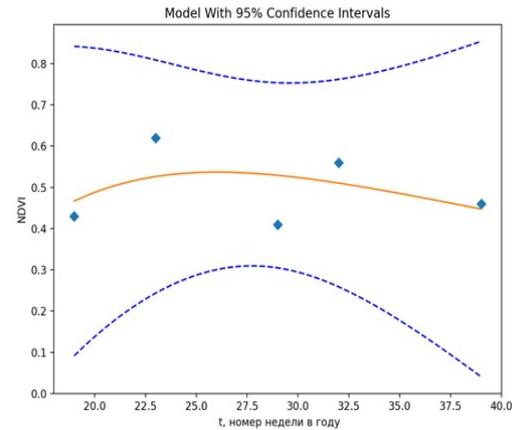
Фоновая территория (33 км)

R-squared: 0,85



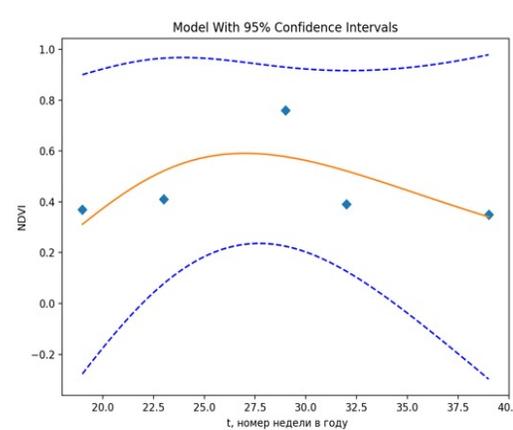
Импактная зона (1 км)

R-squared: 0,67



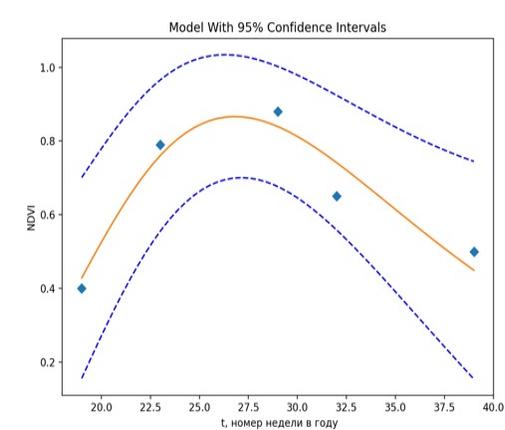
Импактная зона (2 км)

R-squared: 0,17



Буферная зона (6 км)

R-squared: 0,43



Фоновая территория (30 км)

R-squared: 0,91

Таблица 6. Параметры, особые точки уравнения модели (3) зависимости вегетационного индекса NDVI по материалам Modis на 29-ой неделе 2012 года от результирующей концентрации тяжелых металлов (кг/кг) в почве и их удаленность от СУМЗ.

Константы модели	Статистические параметры	Особые точки модели				Расстояние
		z	кг/кг	q	б/р	
$\Lambda = 0,00135$ $K = 0,741$ $B = 4,32E-05$	Root Mean Squared Error (RMSE): 0.11438754922477588	1	7,33E-06	1	0,02	км
	R-squared: 0.4149360848913405	2	1,41E-05	2	0,25	183
	Model F-statistic: 0.7092149663926505	3	2,13E-05	3	0,51	68
	Model F-statistic p-value: 0.5850639151086596	4	5,83E-05	4	0,88	36
	Model log-likelihood: 3.746122541012687	5	1,02E-04	5	0,80	8
	Model AIC: -0.2984490164050748 Model BIC: -0.5327862689446147	6	1,46E-04	6	0,69	3

Допустимый уровень содержания комплекса тяжелых металлов в почве: $z_4 = 58,3$ мг/кг

Местоположения особых точек пересчитаны по: $y = 3E-06x^{-1,516}$

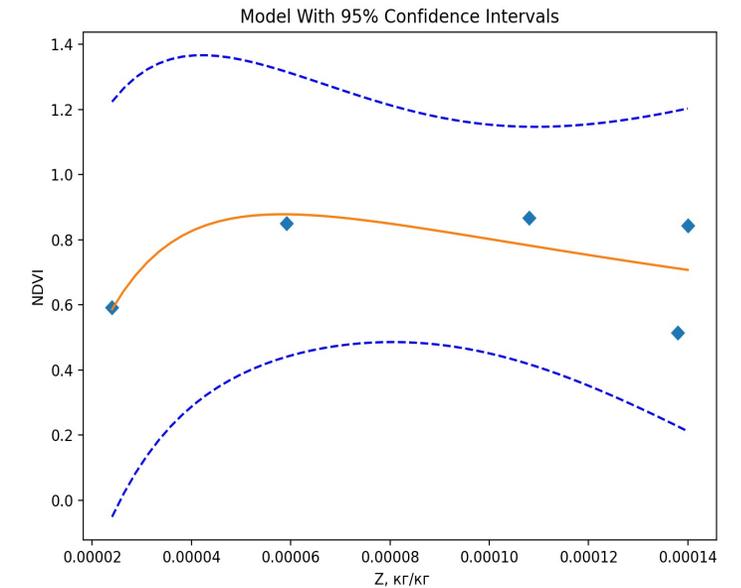


Рис. 8. Дозовая зависимость (от результирующей концентрации тяжелых металлов в почве, абсцисса) вегетационного индекса NDVI (ордината) по материалам Modis на 29-ой неделе 2012 г. для окрестностей СУМЗ (точки соответствуют мониторинговым площадкам (Воробейчик, Кайгородова, 2017), сплошные линии – уравнению (3), пунктирные линии – доверительным интервалам для модели).

Таблица 7. Параметры, особые точки уравнения модели (3) зависимости вегетационного индекса NDVI по материалам Sentinel – 2 на 29-ой неделе 2020 года от результирующей концентрации тяжелых металлов (кг/кг) в почве и их удаленность от СУМЗ.

Константы модели	Статистические параметры	Особые точки модели				Расстояние
		z	кг/кг	q	б/р	
$\Lambda = 0,0298$ $K = 0,36$ $B = 2,06E-05$	Root Mean Squared Error (RMSE): 0.10130115733717024 R-squared: 0.6563802331431134 Model F-statistic: 1.9101934651404608 Model F-statistic p-value: 0.34361976685688655 Model log-likelihood: 4.3535945486970995 Model AIC: -0.5414378194788398	z	кг/кг	q	б/р	км
		1	3,88E-06	1	0,01	249
		2	8,15E-06	2	0,16	127
		3	1,26E-05	3	0,33	86
		4	5,72E-05	4	0,70	22
		5	1,06E-04	5	0,66	12
		6	1,55E-04	6	0,61	9

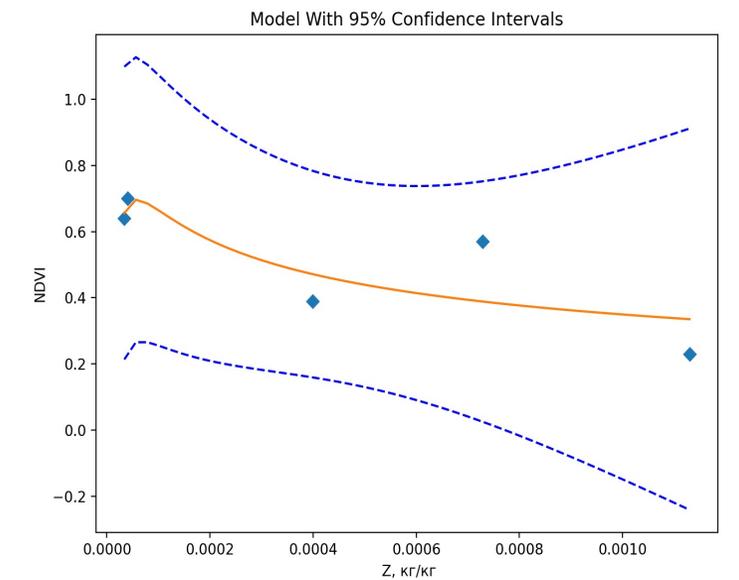


Рис. 9. Дозовая зависимость (от результирующей концентрации тяжелых металлов в почве, абсцисса) вегетационного индекса NDVI (ордината) по материалам Sentinel-2 на 29-ой неделе 2020 г. для окрестностей СУМЗ (точки соответствуют мониторинговым площадкам (Prudnikova et al, 2020), сплошные линии – уравнению (3), пунктирные линии – доверительным интервалам для модели).

Допустимый уровень содержания комплекса тяжелых металлов в

почве: $z_4 = 57,2$ мг/кг

Местоположения особых точек пересчитаны по: $y = 0,003x^{-0,909}$

Ранжирование качества почв по закономерностям отклика растительности на загрязнение почв комплексом поллютантов в окрестностях медеплавильного завода (2012 г.)

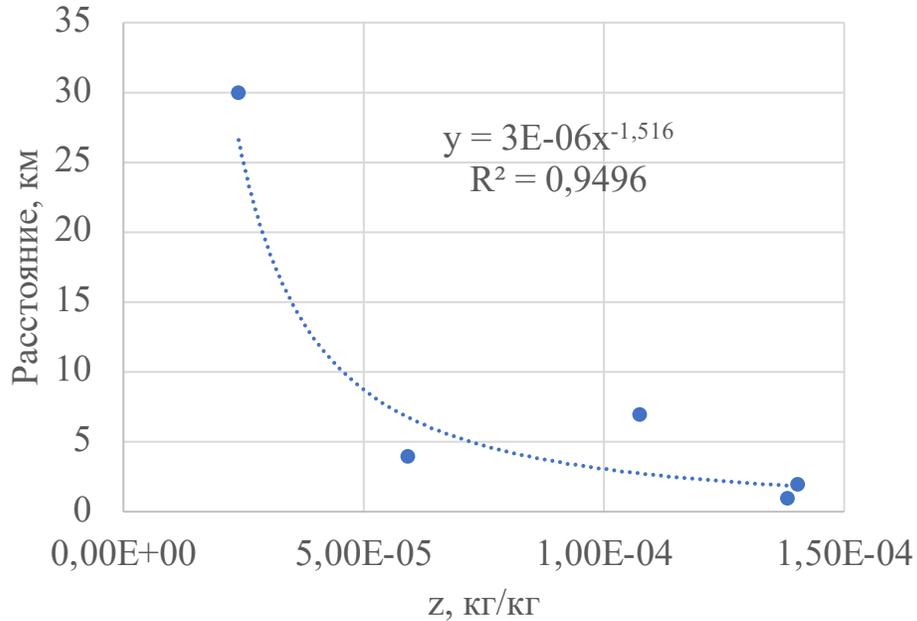


Таблица 8. Пересчитанные по (1) и экстраполированные на основные румбы местоположения точек (Воробейчик, Кайгородова, 2017) с концентрациями тяжелых металлов, соответствующими особым точкам модели, км.

Ветер	Доли ветров	Румбы загрязнения	z1	z2	z3	z4	z5	z6
С	0,10	Ю	166	61	33	7	3	2
С-В	0,03	Ю-З	120	45	24	5	2	1
В**	0,15	З	183	68	36	8	3	2
Ю-В	0,05	С-З	138	51	27	6	3	1
Ю	0,11	С	171	63	34	7	3	2
Ю-З	0,08	С-В	155	58	31	7	3	2
З	0,32	В	222	82	44	10	4	2
С-З	0,16	Ю-В	186	69	37	8	3	2

** - опорный румб.

Ранжирование качества почв по закономерностям отклика растительности на загрязнение почв комплексом поллютантов в окрестностях медеплавильного завода (2020 г.)

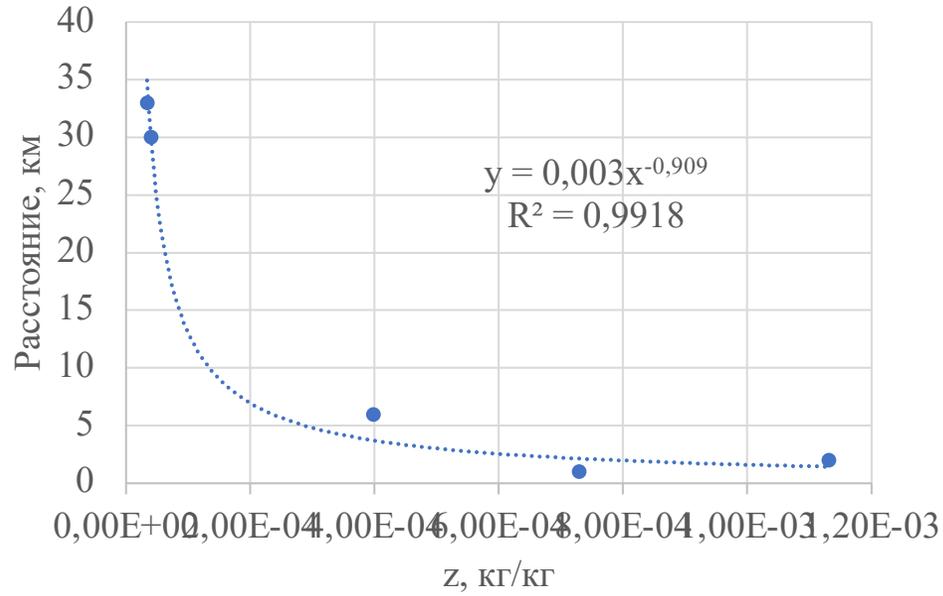


Рис. 11. Удаленность точек (Prudnikova et al, 2020) с заданной степенью загрязнения почвы от источника загрязнения в направлении на запад.

Таблица 9. Пересчитанные по (1) и экстраполированные на основные румбы местоположения точек (Prudnikova et al, 2020) с концентрациями тяжелых металлов, соответствующими особым точкам модели, км.

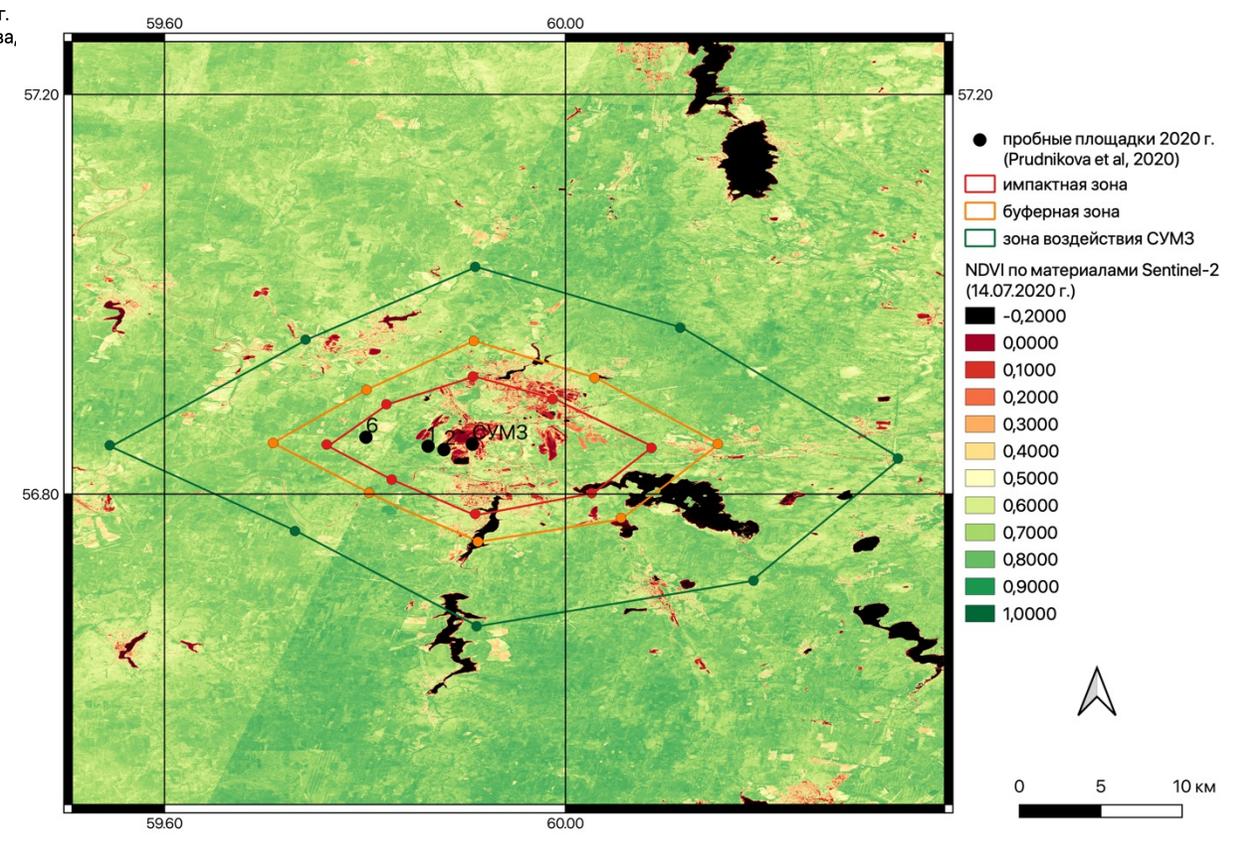
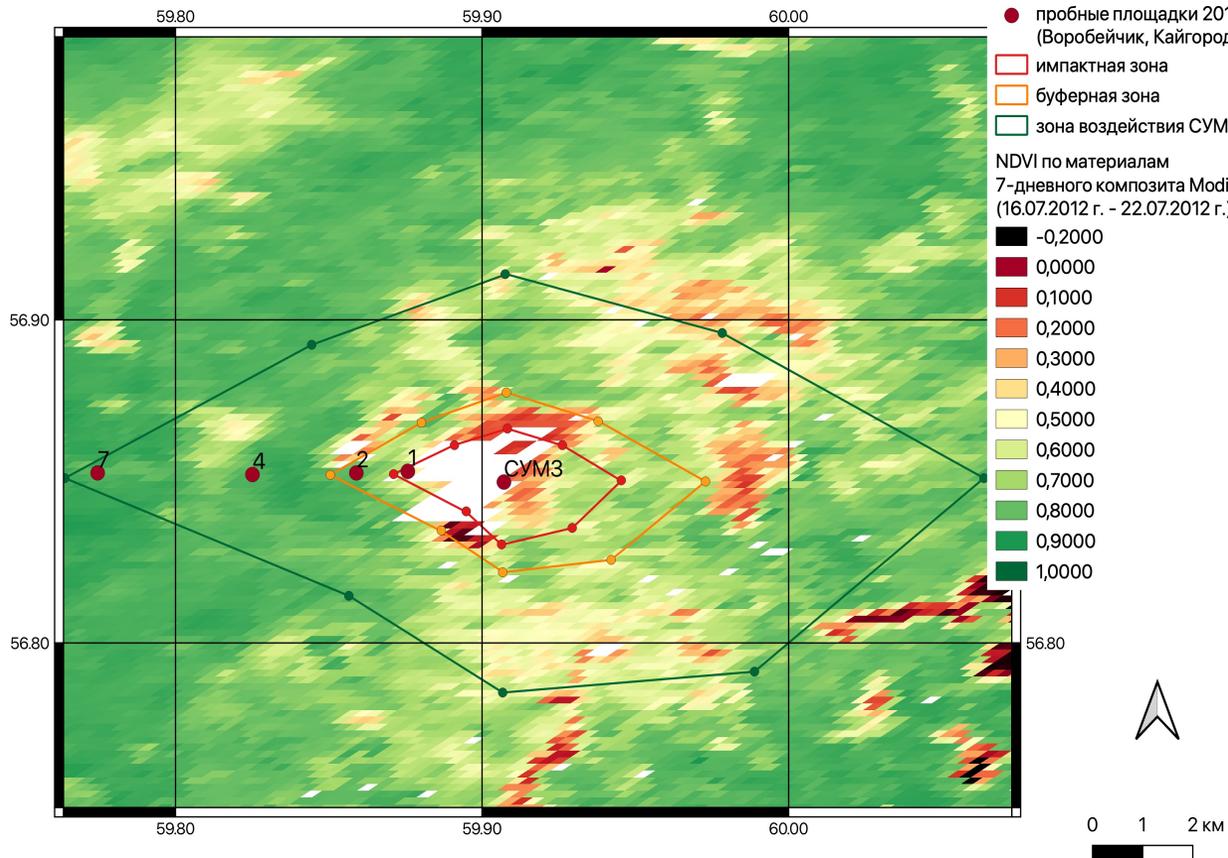
Ветер	Доли ветров	Румбы загрязнения	z1	z2	z3	z4	z5	z6
С	0,10	Ю	226	115	78	20	11	8
С-В	0,03	Ю-З	164	83	56	14	8	6
В**	0,15	З	249	127	86	22	12	9
Ю-В	0,05	С-З	187	95	64	16	9	7
Ю	0,11	С	233	118	80	20	11	8
Ю-З	0,08	С-В	212	108	73	18	10	7
З	0,32	В	302	154	104	26	15	11
С-З	0,16	Ю-В	253	129	87	22	12	9

** - опорный румб.

Картосхема устойчивости почв и растительного покрова к загрязнению комплексом поллютантов в зоне воздействия медеплавильного завода

2012 г.

2020 г.



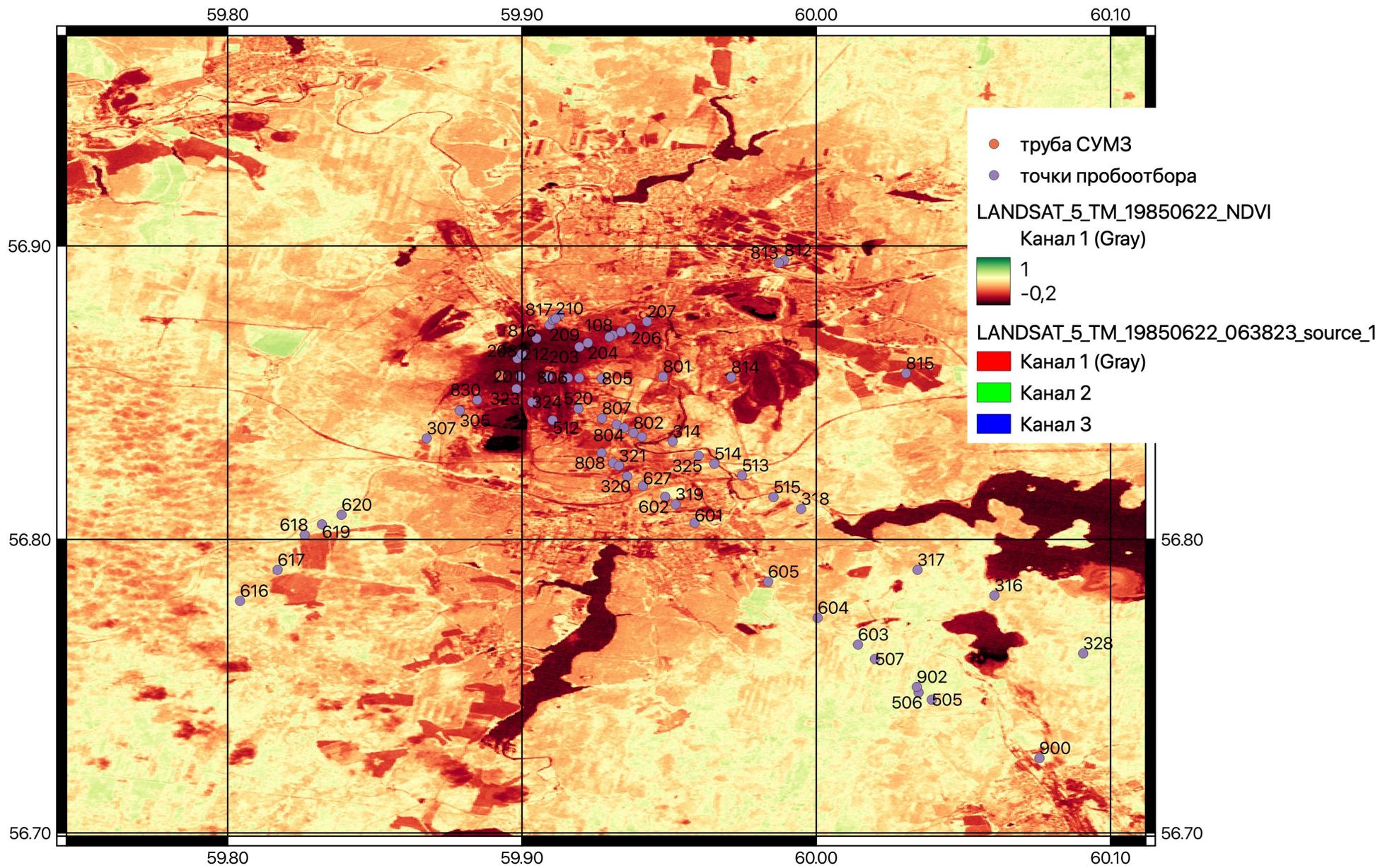
В западном и юго-восточном направлениях зона воздействия простирается на 8 км от СУМЗ, в северо-западном – на 6 км, в северном и северо-восточном – на 7 км. В восточном направлении зона воздействия наиболее продолжительна – её граница удалена на 10 км от завода.

В западном и юго-восточном направлениях зона воздействия простирается на 22 км от СУМЗ, в северо-западном – на 16 км, в северном – на 20 км, в северо-восточном – на 18 км. В восточном направлении зона воздействия наиболее продолжительна – её граница удалена на 26 км от завода.

Выводы:

1. Внутрисезонная динамика NDVI на всех пробных площадках, расположенных на различном удалении от СУМЗ, подчиняется уравнению (2). Среднее значение максимума вегетации приходится на 29-ую неделю в 2012 г. и 27-ую неделю в 2020 г.
2. Пространственная изменчивость вегетационного индекса в пределах исследуемой территории, подчиняется уравнению (3). Закономерный нелинейный отклик на усиливающееся химическое воздействие позволяет выявить пороговую величину концентрации в почве комплекса тяжелых металлов и ранжировать почвы по содержанию тяжелых металлов на основе особых точек модели, разделяющих макроскопические фазы отклика растительности на воздействие комплекса загрязняющих веществ.
3. Пороговая концентрация в почве комплекса тяжелых металлов в форме среднего геометрического из их валовых концентраций составила 57,2 и 58,3 мг/кг для измерений 2012 и 2020 года соответственно. Значения концентрации, соответствующее природному фону, достигали 21,3 мг/кг в 2012 году и 12,6 мг/кг в 2020 году.
4. За период с 2012 г. по 2020 г. зона воздействия СУМЗ многократно увеличилась. В западном и юго-восточном направлениях она простирается на 22 км от СУМЗ, в северо-западном – на 16 км, в северном – на 20 км, в северо-восточном – на 18 км. В восточном направлении она наиболее продолжительна – её граница удалена на 26 км от завода.

Ретроспективная оценка с 1985 по 2020 г.



Представленная методика оценки экологического состояния почв и растительного покрова апробирована на трех объектах:

1. Ямской степи, испытывающей воздействие Белгородского ГОКа.
2. Окрестностях г. Норильска, находящихся в зоне воздействия комбината «Норильский никель».

Публикации:

1. Оценка экологического состояния земель, загрязнённых комплексом тяжёлых металлов, в окрестностях города Норильска за период с 2004 по 2019 г. по материалам NDVI Modis с сервера Вега-science / М. В. Евдокимова, Г. П. Глазунов, А. С. Яковлев и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2021. — Т. 18, № 4. — С. 149–165.
2. The macroscopic kinetics of temporal and spatial variability of the NDVI in Yamskaya steppe reserve under conditions of soil contamination with heavy metals / G. P. Glazunov, V. M. Gendugov, M. V. Evdokimova et al. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2019. — Vol. 16, no. 2. — P. 111–127. [DOI]

Спасибо за внимание!



Публикации:

1. Оценка экологического состояния земель, загрязнённых комплексом тяжёлых металлов, в окрестностях города Норильска за период с 2004 по 2019 г. по материалам NDVI Modis с сервера Вега-science / М. В. Евдокимова, Г. П. Глазунов, А. С. Яковлев и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2021. — Т. 18, № 4. — С. 149–165.
2. The macroscopic kinetics of temporal and spatial variability of the NDVI in Yamskaya steppe reserve under conditions of soil contamination with heavy metals / G. P. Glazunov, V. M. Gendugov, M. V. Evdokimova et al. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. — 2019. — Vol. 16, no. 2. — P. 111–127. [DOI]

Предметом настоящей работы является выявление допустимых уровней антропогенной нагрузки на окружающую среду на локальных экологически неблагополучных участках, обеспеченных достаточным количеством исследовательских данных, а также определение для данных территорий значений природного фона.

Рабочая гипотеза исследования состоит в том, что поступающие по воздуху с территории медеплавильного завода выбросы, содержащие тяжелые металлы, оказывают на растительность, в зависимости от их количества, весь спектр воздействия, от стимулирующего до угнетающего, а функция отклика реципиента (растительного покрова в форме NDVI) на воздействие стрессора, тяжелых металлов в почве, в результате атмосферных выпадений, имеет максимум. При этом совокупная концентрация тяжелых металлов в почве (среднее геометрическое из фактических концентраций) является оптимальной для изучаемого реципиента (растительного покрова).