

Охрана окружающей среды

УДК 574.4:504.054 + 631.4

Исследование и нормирование экологического состояния почв в зоне деятельности металлургического комбината

*М.В. Евдокимова, к.б.н., Г.П. Глазунов, д.б.н., проф. А.С. Яковлев, д.б.н.,
проф. И.О. Плеханова, д.б.н., Р.А. Аймалетдинов, М.В. Шестакова
Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова*

Исследованы макрокинетические характеристики отклика растительного покрова опорных точек в окрестностях г. Норильска в 2004 г. на загрязнение почвы тяжёлыми металлами для обоснования подхода к ранжированию почвенного покрова территорий, находящихся под воздействием выбросов металлургического комбината, по степени напряжённости их экологического состояния. Цель исследования — обоснование возможности объективной количественной оценки экологического состояния почв, загрязнённых тяжёлыми металлами, на основе материалов дистанционного зондирования Земли с использованием теоретической модели отклика живого на воздействие стрессоров в виде тяжёлых металлов. В основе исследования — получение экспериментальных данных вида «доза — ответ» и их анализ с использованием выведенной ранее теоретической модели отклика живого на воздействие стрессора, особые точки которой устанавливают пороговые концентрации стрессора, служащие основой ранжирования почв по степени напряжённости их экологического состояния.

Ключевые слова: экологическое состояние, биоиндикация, математическое моделирование, анализ данных дистанционного зондирования Земли, вегетационный индекс.

Введение

Критериями для оценки степени загрязнения почв химическими веществами на землях сельскохозяйственного назначения и населённых пунктов являются санитарно-гигиенические показатели — их ПДК и ОДК в почвах. Однако, в большинстве случаев за пределами территорий санитарно-защитных зон крупных промышленных предприятий реципиентами химического загрязнения являются экосистемы, для оценки состояния которых санитарно-гигиенические критерии не применимы. На практике в таких случаях прибегают к экспертной оценке [1]. Готовых алгоритмов решения задач по оценке воздействия и интерпретации результатов мониторинга состояния окружающей среды нет. Уровень загрязнения почв химическими веществами сравнивают с их фоновыми концентрациями или с концентрациями на эталонных участках. При этом не учитывается полиэлементный характер загрязнения почв и период воздействия источника загрязнения. Ситуация также осложняется явле-

ниями сезонной динамики, присущими всем экосистемам.

В отсутствии нормативов качества окружающей среды экологической оценке предшествует построение и анализ экспериментальных дозовых зависимостей с целью выявления пороговых концентраций, пригодных для нормирования и оценки качества компонентов среды. Проблемы, требующие решения при выполнении этой задачи, и предложения по их решению являются предметом данной работы и обуславливают её актуальность.

Рабочая гипотеза исследования состояла в том, что поступающие с пылью по воздуху с территории металлургического предприятия химические вещества, содержащие тяжёлые металлы, оказывают на растительность, в зависимости от их количества в почве, весь спектр воздействий, от стимулирующих до угнетающих, что предполагает существование максимума и других особых точек у функции отклика растительного покрова на воз-

действие стрессора в виде тяжёлых металлов в почве, которые могут послужить основой для ранжирования и нормирования воздействия.

Для проверки этой гипотезы были проанализированы: 1) зависимость отклика реципиента в данном случае растительного покрова представленного вегетационным индексом NDVI, который является мерой чистой первичной продукции фотосинтеза, на интенсивность воздействия стрессора, в данном случае в виде трёх тяжёлых металлов в почве, показателем интенсивности воздействия которых служит среднее геометрическое из их фактических валовых концентраций в почве, с использованием метода моделирования [2]; 2) закономерности пространственного распределения значений NDVI в зоне загрязнения.

Пригодность использованной модели [2] для анализа дозовых зависимостей с целью выявления особых точек модели, обеспечивающих объективную основу для ранжирования откликов и построения на их основе критериальных таблиц для целей экологического нормирования и оценки экологического состояния почв, была показана ранее [3] на примере почв и растительного покрова в окрестностях крупного горно-обогатительного предприятия Белгородской области. Необходимым условием применения модели для заявленной цели является уравнивание иных, помимо степени загрязнения, почвенных и растительных условий.

Объекты и методы

Район исследования расположен на севере Красноярского края в южной части полуострова Таймыр. Климат характеризуется продолжительной суровой зимой (средняя температура января до -30°C) и относительно тёплым летом со средней температурой лета $10-13^{\circ}\text{C}$. По данным ресурса World-weather [4] в Норильске преобладают ветры юго-восточного и северо-западного румбов (рис. 1).

Согласно классификации ИКИ РАН [5] растительность района исследований относится к классу «хвойный листопадный лес». В почвенном покрове преобладают тундровые глеевые торфянисто-пе-

регонные (глеезёмы торфянистые и перегонные тундровые), а также таёжные глеевые торфянисто-перегонные почвы (глеезёмы торфянисто-перегонные таёжные) [6]. Антропогенное воздействие на почвы и растительный покров в зоне влияния металлургического комбината осуществляется преимущественно в форме воздействия газово-пылевых выбросов, в которых приоритетными загрязняющими веществами являются медь, никель, кобальт, железо и марганец, а также соединения серы [7]. Необходимые для целей данной работы (табл. 1) концентрации тяжёлых металлов в поверхностном (0-5 см) слое почв, подверженных воздействию разной интенсивности, в зависимости от расстояния до источника в г. Норильск, взяты из работы А.С. Яковлева и др. [7] для пунктов, соответствующих требованию сходства всех, помимо степени загрязнения тяжёлыми металлами, факторов.

Таблица 1

Содержание соединений тяжёлых металлов в поверхностном (0-5 см) слое почвы на разном расстоянии от г. Норильска, мг/кг [7]

Расстояние, км	Cu	Ni	Co	z*
1	972,70	512,40	59,48	309,49
3	440,20	285,00	16,50	127,44
14	213,70	168,50	29,00	101,45
15	411,50	149,50	10,42	86,22
100	29,00	30,00	15,00	23,54

Примечание: z* - среднее геометрическое из концентраций Cu, Ni и Co в почве.

Анализ особенностей рельефа по материалам GMTED2010 радарной съёмки, проведённый с использованием свободно распространяемой ГИС SAGA, позволил установить (рис. 2, 3, 4, см. вклейку), 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. 2) также оказались пренебрежимо малыми по их вкладу в различие температур за счёт различий в высоте над уровнем моря: максимальная разница абсолютных высот между площадками достигает 212 м, что обеспечивает пренебрежимо малую (порядка $1,4^{\circ}\text{C}$) максимальную разницу в температурах за счёт перепада высот.

Опираясь на сведения о генетической принадлежности и химических свойствах почв пробных площадок и закономерностях их расположения в рельефе, в качестве первого приближения приняли, что почвенные и температурно-влажностные условия пробных площадок, за исключением содержания в них тяжёлых металлов, можно считать

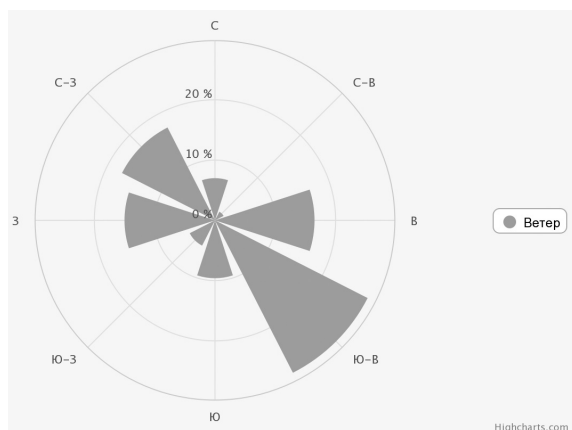


Рис. 1. Роза ветров для г. Норильска [4]

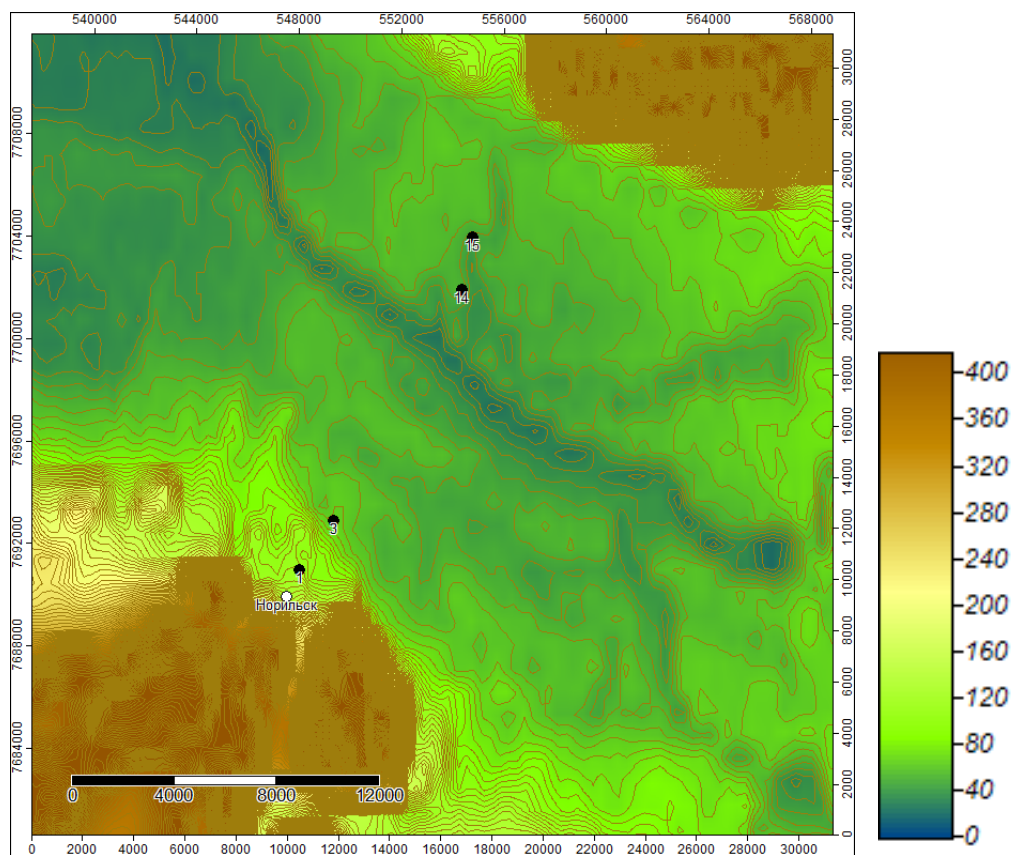


Рис. 2. Карта рельефа исследуемой территории

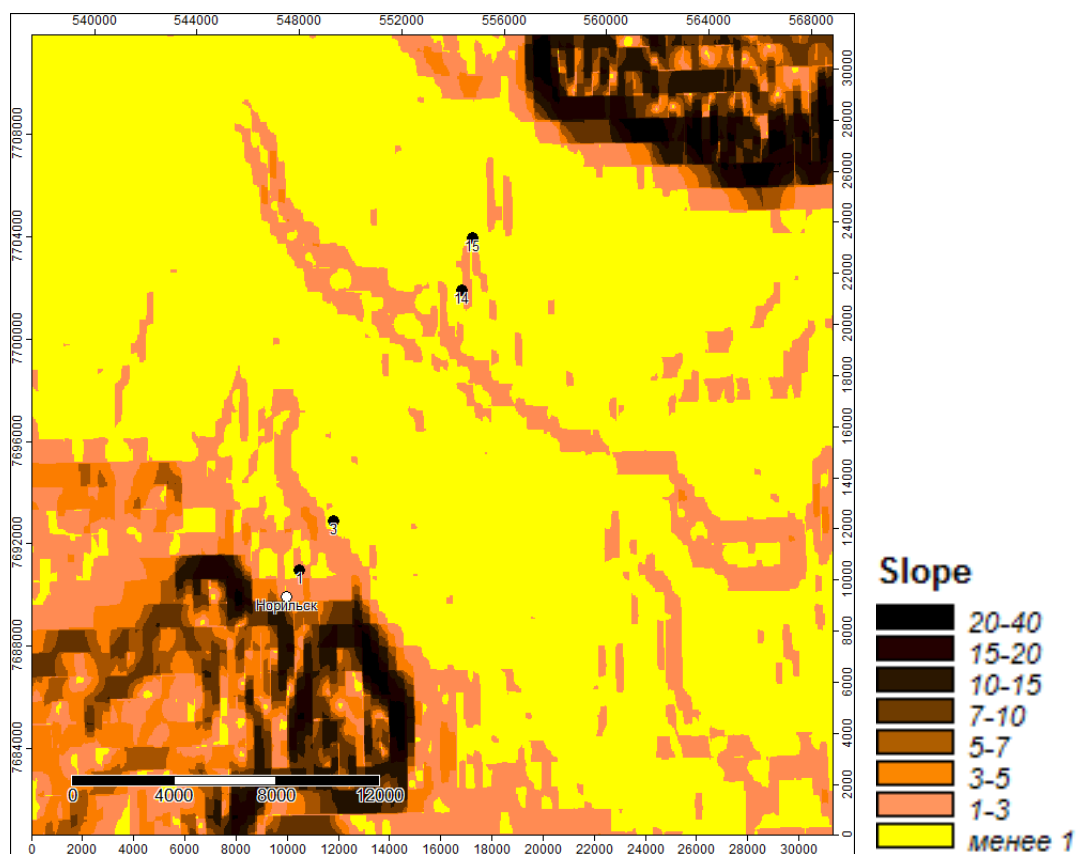


Рис. 3. Карта крутизны склонов исследуемой территории

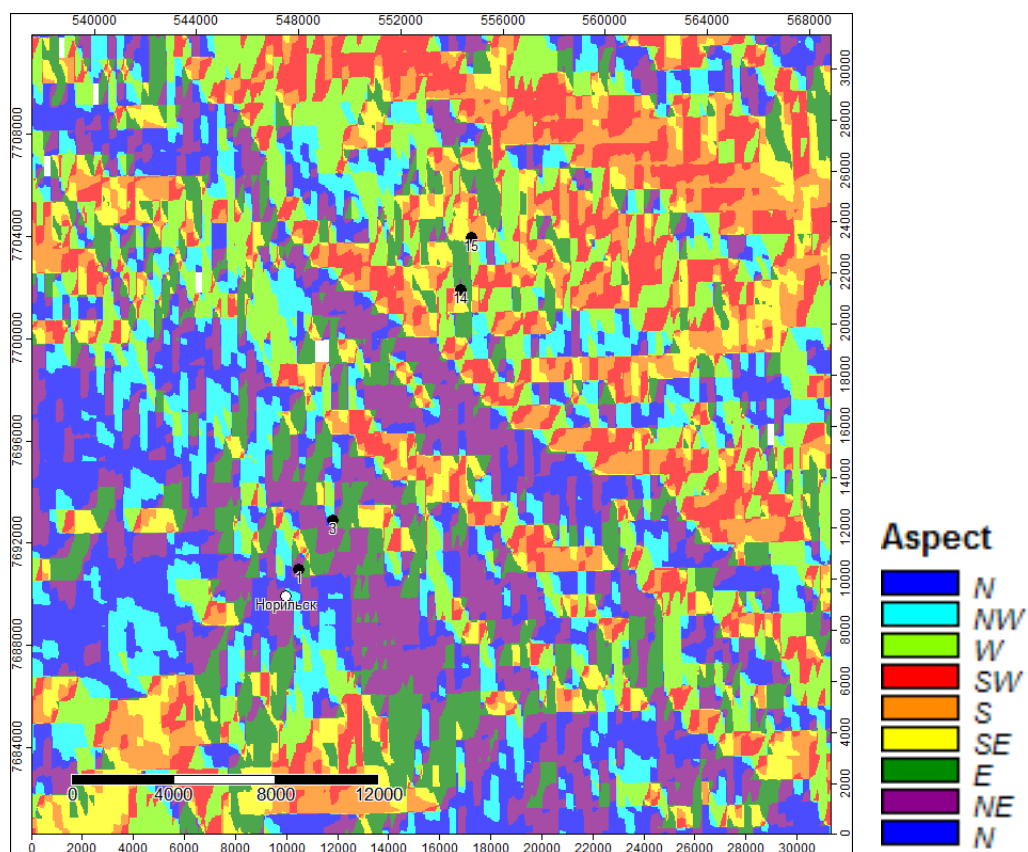


Рис. 4. Карта экспозиции склонов исследуемой территории

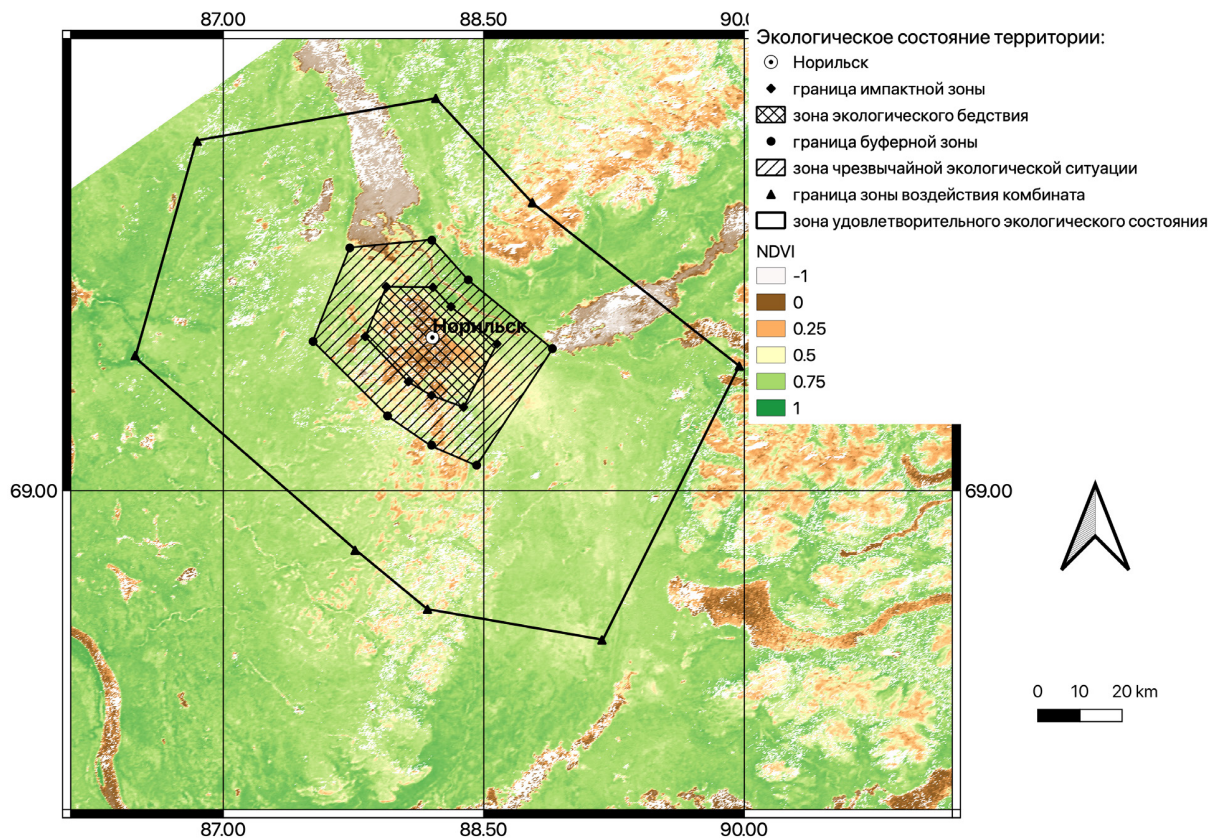


Рис. 8. Зонирование территории в окрестностях металлургического комбината

одинаковыми по их способности поддерживать растительные сообщества, а причину различий между ними в закономерностях сезонной динамики NDVI можно отнести на счёт различий в степени загрязнения почвы пробных площадок тяжёлыми металлами.

Для обеспечения возможности выявления пространственных, обусловленных разной степенью загрязнения почвы тяжёлыми металлами, закономерностей распределения фотосинтетически активной биомассы по территории в зоне воздействия металлургического комбината и последующего нормирования, необходимо было определить коэффициенты дозовой зависимости в форме решения, полученного ранее [2]:

$$q = \Lambda e^{-K/z} z^{-B} \quad (1)$$

где: Λ — масштабирующий коэффициент, K — коэффициент, характеризующий интенсивность возрастания фотосинтетически активной биомассы в ответ на рост интенсивности воздействия (в форме роста показателя концентрации тяжёлых металлов, z), B — коэффициент, характеризующий интенсивность убывания фотосинтетически активной биомассы в ответ на рост интенсивности воздействия (процессы, ведущие к возрастанию фотосинтетически активной биомассы, протекают одновременно с процессами, ведущими к её убыванию).

В качестве меры концентрации фотосинтетически активной биомассы q на пробных площадках, каждой из которых был поставлен в соответствие один пиксель, использовали максимальные за вегетационный сезон 2004 года значения индекса NDVI, полученные по материалам MODIS (7-дневный, интерполяция) из источника [http://sci-vega.gsfc.nasa.gov](http://sci-vega.gsfc.nasa.gov/data/data_modis.html) (рис. 5). Анализ материалов космической съемки и подготовку картографических материалов проводили в QGIS 3.12.

Коэффициенты уравнения (1) определили (табл. 2) его приближением к экспериментальным данным по способу наименьших квадратов (рис. 6).

Получение коэффициентов модели открыло возможность нахождения анализом производных первого, второго и третьего порядков от вегетационного индекса по z с использованием свободно распространяемого пакета программ компьютерной алгебры Maxima (<https://sourceforge.net/projects/maxima/>) шести особых точек модели (см. табл. 2, рис. 6), разделяющих кривую отклика на семь фаз отклика, характеризующих сходством макроскопической кинетики.

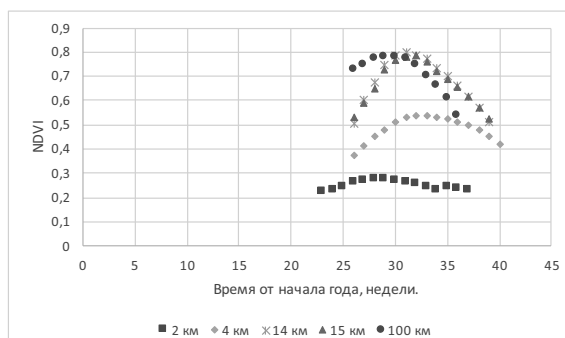


Рис. 5. Динамика индекса NDVI за вегетационный период 2004 года по пунктам отбора проб на разном удалении от г. Норильска в направлении на северо-восток

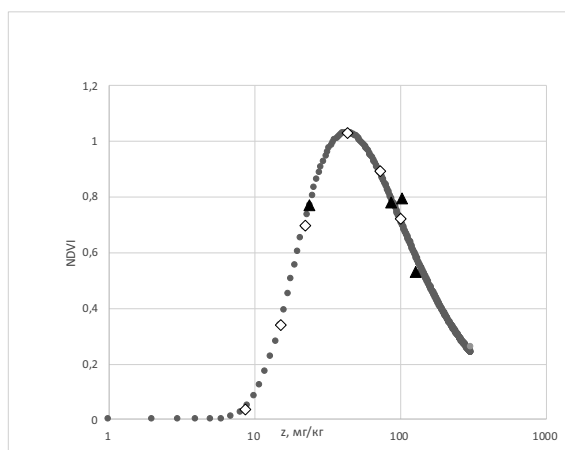


Рис. 6. Зависимость вегетационного индекса NDVI от показателя концентрации тяжёлых металлов в почве (по материалам [7]) в окрестностях г. Норильска: точки — по модели (1), треугольники — наблюдения, ромбы — особые точки модели

Для обеспечения возможности экстраполяции пороговых значений z , соответствующих особым точкам модели, на оси, направленные вдоль основных румбов от источника загрязнения тяжёлыми металлами, сначала по данным табл. 1 исследовали эмпирическую связь (рис. 7) между концентрацией тяжёлых металлов z в почве и удалённостью от источника загрязнения на северо-восток.

Оказалось, что удалённость R от источника загрязнения связана с концентрацией в почве тяжёлых металлов z эмпирической зависимостью: $R = 38716 z^{-1,831}$, что позволило вычислить расстояния R для особых точек в направлении на северо-восток от источника (см. табл. 2) и, опира-

Таблица 2

Константы модели, абсциссы особых точек (мг/кг) и их удалённость (км) от источника

B	L	K	z1	z2	z3	z4	z5	z6
1,32	576,49	57,79	9	15	22	44	72	100
Расстояние R от источника на C-B, км			764	271	135	38	15	8
Расчётные NDVI для особых точек			0,04	0,34	0,70	1	0,89	0,72

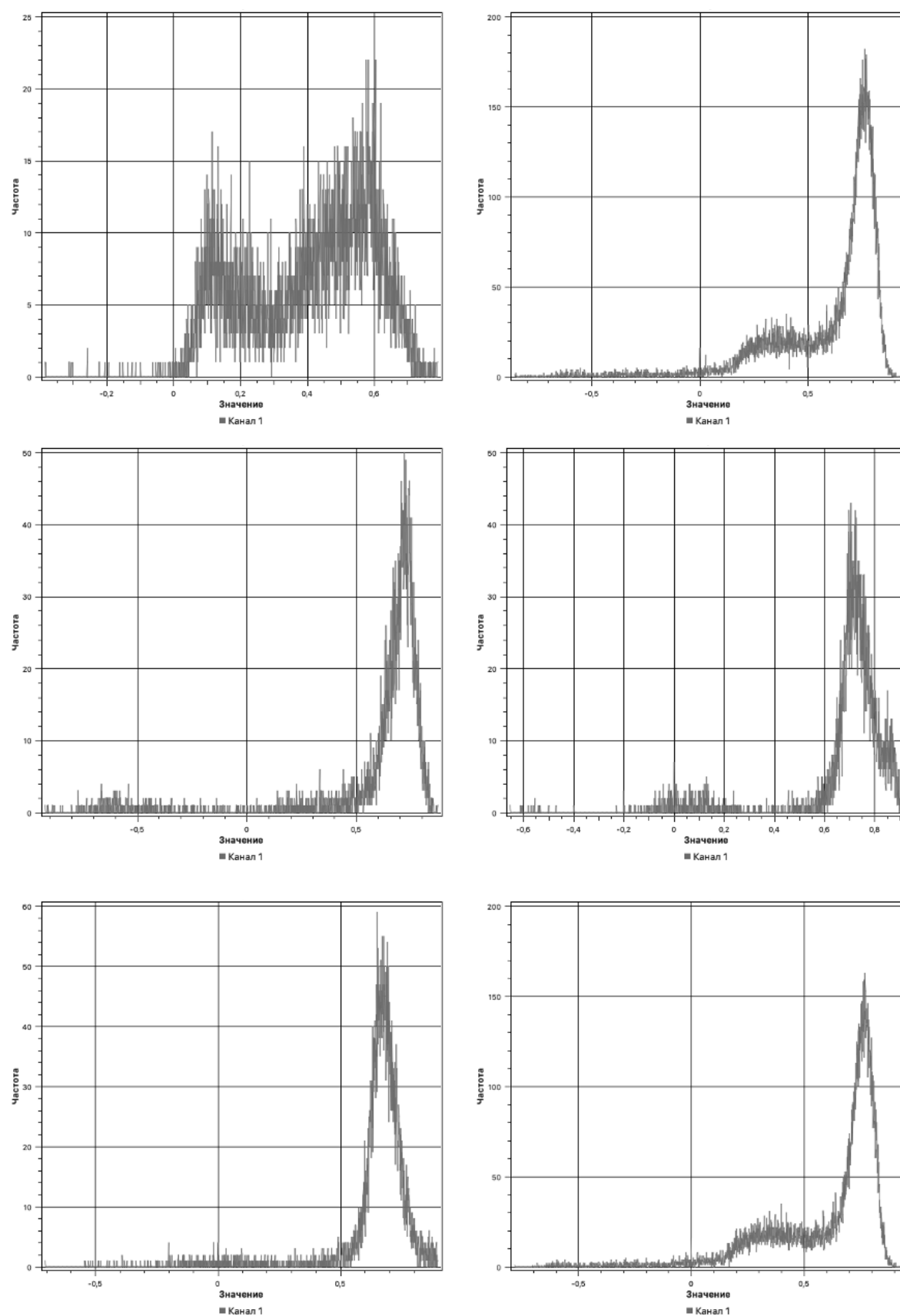


Рис. 9. Гистограммы распределения максимальных за сезон NDVI по зонам: экологического бедствия — слева сверху, чрезвычайной экологической ситуации (кризиса) — справа сверху, удовлетворительного экологического состояния (нормы) — три графика, два посередине и один слева внизу, фоновое состояние — справа внизу

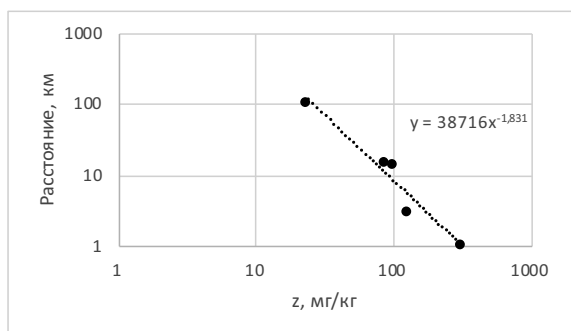


Рис. 7. Расстояние от источника загрязнения в направлении на С-В в функции концентрации тяжёлых металлов

ясь на представление о единстве законов переноса загрязняющих веществ ветром, экстраполировать расстояния R с опорного направления на остальные румбы, полагая, что коэффициент пересчёта равен корню четвёртой степени из отношения доли ветров нужного румба к доле ветров опорного румба (табл. 3).

Таблица 3

Экстраполированные на основные румбы местоположения точек с концентрациями тяжёлых металлов z , соответствующими особым точкам модели, км

Направление	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6
С	1105	393	195	56	22	12
С-В	764	271	135	38	15	8
В	1370	487	241	69	27	15
Ю-В	1569	557	276	79	31	17
Ю	1196	425	211	60	24	13
Ю-З	1001	355	176	50	20	11
З	1337	475	235	67	27	15
С-З	1384	492	244	70	28	15

Материалы табл. 3 послужили основой оконтуривания расчётных ареалов предполагаемого одинакового загрязнения почв тяжёлыми металлами путём соединения прямыми линиями местоположений соответственных особых точек, взятых на восьми румбах. Для выявления соответствия законов распределения величин NDVI в пределах ареалов, ограниченных изнутри и извне значениями, характерными для соседних особых точек, законам распределения значений NDVI между соседними особыми точками в фазовой плоскости «доза-ответ» (рис. 8, см. Вклейку), анализировали гистограммы распределения величин NDVI в пределах ареалов, выделенных на территории находящейся под воздействием выбросов с предприятия (рис. 9).

Основой для анализа гистограмм служат расчётные значения NDVI в особых точках (см. табл. 2), для которых на кривой отклика имеются близкие значения, полученные из опыта. Поэтому особые точки z_2 и z_1 , как не обеспеченные опытными аналогами, в дальнейшем анализе не использовались.

Результаты и обсуждение

Результирующая z концентраций трёх тяжёлых металлов, соответствующая точке максимума на кривой отклика растительного покрова в форме NDVI на концентрацию тяжёлых металлов (см. рис. 6), принята за пороговую, так как и увеличение и уменьшение концентрации тяжёлых металлов в окрестностях этой точки сопровождаются снижением и расчётных и наблюдаемых значений NDVI.

Оптимальная, соответствующая максимуму отклика растительного покрова в форме NDVI на воздействие тяжёлых металлов, концентрация z равна 44 мг/кг (табл. 2). Убывание z в области значений менее оптимальной согласно модели должно сопровождаться уменьшением отклика растительности в форме NDVI, что и нашло своё подтверждение в результатах наблюдений, согласно которым NDVI при $z = 24,54$ существенно меньше, чем при $z = 44$. Подтверждаемое опытными данными явление закономерного уменьшения NDVI в результате увеличения концентрации тяжёлых металлов в почве сверх найденной оптимальной и перекрытие опытными точками промежутка с особыми точками модели служат обоснованием возможности ранжирования откликов на воздействие тяжёлых металлов и нормирование их содержания в почве на основе z_4, z_5, z_6 . В то же время экспериментальных данных явно недостаточно для обоснования нормирования в области малых концентраций, не превышающих пороговую z_4 .

Анализ макроскопической кинетики [2] отклика NDVI на концентрации тяжёлых металлов по материалам для опорных точек (см. табл. 2, 3) расположенных вдоль опорного направления от г. Норильска на северо-восток, показал, что техногенное воздействие в этом направлении проявляется на протяжении 38 км. В соответствии с критериями оценки экологической обстановки [8] состояние почвенного и растительного покровов территории, расположенной между границами, ассоциированными с z_5 , удалённой на северо-восток от г. Норильска на 15 км, и z_4 , удалённой на 38 км, соответствует «удовлетворительной экологической ситуации». Данная градация включает в себя первые три уровня шкалы ранжирования состояния окружающей среды по [9, 10]. Полученные результаты согласуются с данными Корец и др. [11] 2004 года. Состояние территории, расположенной между границами импактной зоны, ассоциированной с особой точкой z_6 , удалённой на 8 км на северо-восток, и буферной зоной, ассоциированной с особой точкой z_5 , удалённой на 15 км, по критериям [8] соответствует «чрезвычайной экологической ситуации» и четвёртому уровню шкалы ранжирования состояния окружающей среды [9]. В пределах границы, ассоциированной с z_6 , удалённой на северо-восток на 8 км, почвенный и растительный покровы характеризуются крайней степенью деградации и по критериям [8]

подпадают под определение категории «экологическое бедствие». В соответствии с [9] экологическое состояние окружающей среды характеризуется 5 уровнем опасности — природные среды необратимо нарушены.

Экстраполяция местоположений пунктов с концентрациями, соответствующими концентрациям особых точек модели (см. табл. 3), с опорного румба на остальные семь румбов позволила оконтурить расчётные ареалы предполагаемого одинакового загрязнения почв тяжёлыми металлами, путём соединения прямыми линиями местоположений соответствующих особых точек, взятых на восьми румбах (см. рис. 8) и ранжировать полученные ареалы по категориям качества. Для выявления соответствия законов распределения величин NDVI в пределах выделенных ареалов, законам распределения значений NDVI между соседними особыми точками в фазовой плоскости «доза-ответ» (см. рис. 6), анализировали гистограммы распределения величин NDVI в пределах ареалов, выделенных на территории воздействия предприятия.

Согласно макроскопической кинетике отклика растительного покрова на стресс, вызванный воздействием тяжёлых металлов, внешнюю границу зоны экологического бедствия ассоциировали с особой точкой z_6 для которой $NDVI = 0,72$; внешнюю границу зоны чрезвычайной экологической ситуации ассоциировали с особой точкой z_5 для которой $NDVI = 0,89$; внешнюю границу зоны удовлетворительного экологического состояния (нормы) ассоциировали с особой точкой z_4 , точкой максимума, для которой $NDVI = 1,0$; а внешнюю границу фоновой территории ассоциировали с особой точкой z_3 для которой $NDVI = 0,7$. Из этого эмпирического факта следует, что существует оптимальная для исследуемых экосистем концентрация смеси тяжёлых металлов в почве, z_4 . Анализ гистограмм призван выяснить, насколько истинные частоты встречаемости значений NDVI соответствуют эмпирическим границам, ассоциированным с особыми точками модели. При рассмотрении гистограмм (см. рис. 9), как и при анализе дозовой зависимости (см. рис. 6) обращают на себя внимание высокие значения вегетационного индекса NDVI в особых точках. Применительно к гистограммам это отчасти объясняется тем, что анализировали максимальные за сезон значения. Применительно к дозовой зависимости это отчасти является следствием малой густоты опытных точек в окрестностях точки максимума, что и привело к завышению ординаты точки максимума в результате регрессионного анализа.

Тот факт, что во всех зонах встречаются практически все возможные значения NDVI является следствием высокого варьирования свойств экосистем, отвечающих за отклик на воздействие, приводящего к невыполнению требования равенства прочих равных условий при анализе дозовой за-

висимости. Следствием этого является необходимость проводить типизацию растительного покрова и опираться на разные дозовые зависимости что приведёт к дроблению зон одинакового экологического состояния. В данном случае опирались на одну дозовую зависимость, обеспечившую систему концентрических зон экологического состояния сплошного залегания.

Характер распределения истинных значений NDVI для зоны экологического бедствия (см. рис. 9, слева сверху) исключительно полно поддерживает использованную теорию зонирования на основе анализа дозовой зависимости — около 99% значений NDVI не превышают пороговую величину 0,72. Таким образом, зону экологического бедствия можно выявить и оконтурить ограничившись лишь анализом NDVI, опираясь на пороговую величину 0,72. Более того, наличие в распределении пика в области малых значений NDVI является дополнительным индикатором состояния экологического бедствия.

Характер распределения истинных значений NDVI для зоны чрезвычайной экологической ситуации (см. рис. 9, справа сверху) также поддерживает теорию — около 99% значений NDVI не превышают пороговую величину 0,89. Однако, около 30% пикселей в этой зоне по величине NDVI (менее 0,7) должны относиться к зоне экологического бедствия. Таким образом, удовлетворение требования сплошности зонирования привело к недооценке тяжести экологического состояния примерно на 30% площади зоны. В то же время эти результаты свидетельствуют о том, что использование установленных верхних граничных значений для этих двух зон позволит получить весьма точную карту дискретных зон экологического состояния (оценочно, 99% пикселей получают адекватную оценку экологического состояния по величине NDVI).

Характер распределения истинных значений NDVI для зоны удовлетворительного экологического состояния (см. рис. 9, два графика посередине и один слева внизу) свидетельствует о том, что около 50% пикселей ошибочно отнесены к категории с удовлетворительным состоянием. Тогда как по величине NDVI они должны относиться к зоне чрезвычайной экологической ситуации.

Таким образом, удовлетворение требования сплошности зонирования привело к недооценке тяжести экологического состояния примерно на 50% площади зоны. В то же время эти результаты свидетельствуют о том, что использование установленных верхних граничных значений для этих трёх зон, соответственно, 0,72, 0,89 и 1 позволит с высокой точностью получить карту дискретных зон экологического состояния (оценочно, 99% пикселей получают адекватную оценку экологического состояния по величине NDVI).

Характер распределения истинных значений NDVI для фоновой территории (см. рис. 9, справа

внизу) свидетельствует о том, что ориентировочно 30% пикселей не соответствуют принадлежности к зоне фонового состояния ввиду низких значений NDVI, менее 0,7. Формально, в рамках используемой теории, причиной таких отклонений служит несоответствие требованию равенства прочих равных условий, что приводит к необходимости проведения типизации растительного покрова и экспериментальному получению дозовых зависимостей, адекватных характеру загрязнения и типу растительного покрова.

Заключение

По результатам теоретического исследования в приближениях сплошной среды при оговорённых ограничениях установлено, что экспериментальный отклик растительного покрова (в форме NDVI) на воздействие стрессора (в виде тяжёлых

металлов в почве) соответствует законам сохранения механики и химической и биохимической макроскопической кинетике живых реагирующих систем, откуда следует, что экологическую оценку состояния почв в окрестностях источника выброса в атмосферу тяжёлых металлов можно проводить на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли в форме вегетационного индекса NDVI, предварительно установив на основе спутниковых измерений в опорных точках территории параметры теоретической зависимости вида «доза — ответ» для одинаковых почв при прочих равных условиях с использованием разработанной теоретической модели.

Работа осуществлена в рамках госзадания МГУ (№ гос.регистрации: 115122210057-9).

Литература

1. Крутова Л.С. Предпосылки формирования комплексного подхода к управлению экологическими рисками на предприятии химической промышленности // Использование и охрана природных ресурсов в России, 2017. №3 (151). — С. 74-83.
2. Гендугов В. М., Глазунов Г. П. Макрокинетическая модель микробного роста на многокомпонентном субстрате // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение, 2014. № 3. — С. 10 — 16.
3. Глазунов Г. П., Гендугов В.М., Евдокимова М.В., Титарев Р.П., Шестакова М.В. Макроскопическая кинетика временной и пространственной изменчивости вегетационного индекса NDVI на территории заповедника «Ямская степь» в условиях загрязнения почвы тяжёлыми металлами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019. Т. 16. № 2. — С. 111—127
4. График ветра. URL: <https://world-weather.ru/archive/russia/norilsk/>
5. Карта растительности. URL: <http://sci-vega.ru/maps/>
6. Почвенная карта Российской Федерации, 2019. URL: <http://gis.krasn.ru/mserver/app/view.php?id=b014c8bb-e569-0ff2-8266-1b116fc83de8&pos=44232.0575,-3855062.4932&zom=3&tile=&key=akbvckwd3qbut4d#>
7. Яковлев А.С., Плеханова И.О., Кудряшов С. В., Аймалетдинов Р.А. Оценка и нормирование экологического состояния почв в зоне деятельности предприятий металлургической компании «Норильский никель» // Почвоведение, 2008. №6. — С. 737-750.
8. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия / Н.Г. Рыбальский, В.Н. Кузьмич, Н.П. Морозов и др. — М.: Минприроды России, 1992.
9. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба. — М.: Госкомэкология России, 1999.
10. Яковлев А.С. Допустимое экологическое состояние почв и антропогенное воздействие как основа их экологического нормирования и управления качеством // Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель / Под общ.ред. С. А. Шобы, А.С.Яковлева, Н.Г.Рыбальского. —М.: НИА-Природа, 2013. — С. 10 — 21.
11. Корец М.А., Рыжкова В.А., Бартаев С. А. Оценка состояния растительного покрова в зоне воздействия промышленных предприятий с использованием данных ENVISAT MERIS и SPOT Vegetation // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2006. Вып. 3. Т. 2. — С. 330-334.

Сведения об авторах:

Евдокимова Мария Витальевна, к.б.н., с.н.с. лаборатории экологического нормирования и оценки почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова; 119991, Ленинские горы, д. 1, стр.12; e-mail: mawkae@gmail.com.

Глазунов Геннадий Павлович, д.б.н., проф. кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ; e-mail: glazng@mail.ru.

Яковлев Александр Сергеевич, д.б.н., проф., завкафедрой земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ; e-mail: yakovlev_a_s@mail.ru.

Плеханова Ирина Овакимовна, д.б.н., доцент, в.н.с. лаборатории экологического нормирования и оценки почв факультета почвоведения МГУ; e-mail: irinaoplekhanova@mail.ru.

Аймалетдинов Руслан Алиевич, специалист лаборатории химии гумусовых веществ и минеральных соединений факультета почвоведения МГУ; e-mail: aimarus@yandex.ru

Шестакова Мария Владимировна, аспирантка кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения МГУ; e-mail: mariykashe@rambler.ru.