Макроскопическая кинетика временной и пространственной изменчивости вегетационного индекса NDVI на территории заповедника «Ямская степь» в условиях загрязнения почвы тяжёлыми металлами

Г. П. Глазунов, В. М. Гендугов, М. В. Евдокимова, Р. П. Титарев, М. В. Шестакова

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова Москва, 119991, Россия E-mail: glazng@mail.ru

Обоснован подход к выявлению закономерностей временной и пространственной изменчивости фотосинтетически активной биомассы на основе анализа данных (NDVI, Landsat-8) дистанционного зондирования Земли с использованием теоретического уравнения, выведенного ранее в рамках законов сохранения механики и макроскопической химической кинетики живых реагирующих систем. Показано, что при условии введения постоянной для каждой мониторинговой площадки (пикселя) результирующей (в форме среднего геометрического) начальной концентрации содержащихся в почве тяжёлых металлов (Li, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, Pb) в константы уравнения одномодальная сезонная динамика вегетационного индекса подчиняется теоретическому уравнению, константы и особые точки которого являются индивидуализирующими характеристиками каждой плошалки (пикселя). При условии введения в константы уравнения фиксированного времени закономерности пространственного изменения вегетационного индекса по мониторинговым площадкам (пикселям) с одинаковыми, помимо концентрации тяжёлых металлов, почвенными свойствами сведены к уравнению дозовой зависимости, константы и особые точки которого являются индивидуализирующими характеристиками отклика фотосинтетически активной биомассы (NDVI) на результирующую начальную концентрацию в почве тяжёлых металлов данного набора.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, Landsat-8, NDVI, экологический мониторинг, экологическое нормирование, макроскопическая биокинетика, закон биологического роста, закон толерантности, тяжёлые металлы, дозовая зависимость, гормезис, ПДК, нормирование качества почв, сезонная динамика фотосинтетически активной биомассы

Одобрена к печати: 29.03.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-111-127

Введение

Среди глобальных проблем, встающих перед человечеством в XXI в., как минимум двепродовольственная и экологической безопасности — напрямую связаны с устойчивостью функционирования почв и других компонентов окружающей среды. Для оценки состояния и нормирования качества компонентов окружающей среды созданы соответствующие национальные системы мониторинга и нормативы качества, находящиеся в процессе непрерывного совершенствования, обусловленного увеличением числа источников загрязнения и появлением новых загрязняющих веществ. Наиболее информативными среди перспективных систем непрерывного мониторинга окружающей среды являются глобальные спутниковые системы, поставляющие в режиме открытого доступа многочисленные параметры дистанционного зондирования Земли, полезные в деле оценки состояния и нормирования качества почв и растительности (Барталев и др., 2016). Высокая степень коррелированности значений вегетационных индексов и текущей фотосинтетически активной биомассы на земной поверхности, установленная многими исследователями, даёт возможность использовать индексы в системах распознавания и мониторинга растительности (Барталев, Лупян, 2013; Жукова и др., 2009; Терехин, 2017). Одним из очевидных направлений повышения информативности методов дистанционного зондирования Земли, основанных на вегетационных индексах, является их использование для вычисления параметров, характеризующих закономерности сезонной динамики растительного покрова (Медведева и др., 2011). В качестве информативных показателей, извлекаемых анализом сезонных рядов вегетационных индексов, используют: дату начала/окончания вегетационного периода, его продолжительность, время наступления максимума роста и сам максимум, площадь под сезонной кривой динамики и др. (Медведева и др., 2010; Пугачева, Шевырногов, 2008; Sakamoto et al., 2005). В теоретическом плане преимуществом этих показателей является то, что они основаны на результатах измерений и получены формальными методами с использованием математических приёмов, часто весьма сложных. В практическом плане их плюс состоит в наличии алгоритмов и методов их автоматической генерации на основе первичных данных дистанционного зондирования Земли (Jamali et al., 2014). Недостаток известных нам показателей, ограничивающий их информативность, заключается в том, что они получены опытным путём на основе произвольных критериев. Этого минуса лишены показатели, выводимые из теоретических моделей, раскрывающих скрытые закономерности динамики и пространственного варьирования растительного покрова.

В связи с этим нами поставлена задача обоснования применимости к анализу закономерностей временного и пространственного варьирования показателя NDVI теоретической модели, выведенной нами ранее в рамках законов сохранения механики и макроскопической химической кинетики реагирующих биологических систем с использованием представлений сплошной среды для биологических систем, растущих на одно- и многокомпонентных субстратах (Гендугов, Глазунов, 2014; Гендугов и др., 2013). Возможность такого подхода подтверждается успешной проверкой адекватности этой теоретической модели экспериментальным данным по микробному росту и росту высших растений (Глазунов и др., 2013). Преимуществом данной модели является то, что в случае её адекватности экспериментальным данным она позволяет выявить скрытые закономерности динамики и пространственного варьирования и получить содержательные показатели динамики растущей системы, а также показатели её отклика на воздействие химических стрессоров объективными методами анализа временных рядов. В применении к вегетационному индексу NDVI поставленную задачу проще всего решить на примере материалов дистанционного зондирования территории заповедника, в котором режим ограничения хозяйственной деятельности в максимально возможной степени обеспечивает естественный ход динамики фитомассы (в том числе и фотосинтетически активной её части, от которой и зависит NDVI) и тем самым позволяет обоснованно отнести различия в показателях динамики NDVI между одинаковыми во всех отношениях, кроме степени загрязнения тяжёлыми металлами, площадками (пикселями) на счёт влияния тяжёлых металлов.

Объекты и методы

Указанным требованиям к проведению исследования в наибольшей степени отвечают условия находящегося на северо-востоке Белгородской области, в зоне влияния крупного горнообогатительного комбината, участка «Ямская степь» государственного природного заповедника «Белогорье», расположенного в бассейне р. Оскол на выровненном водоразделе с врезанными вершинами балок. Участок покрыт преимущественно миграционно-мицеллярными чернозёмами на карбонатных лёссовидных суглинках и глинисто-иллювиальными чернозёмами на бескарбонатных лёссовидных суглинках под различными вариантами ковыльных и овсецовых степей, замещающихся в последние десятилетия остепенёнными лугами и местами — тёмно-серыми лесными почвами под водораздельными дубравами, а по балкам — под различными лесами и кустарниками (Русаков, 2012). Почвы заповедника загрязняются тяжёлыми металлами, содержащимися в пыли, поступающей с горно-обогатительного комбината по воздуху (Бакунович и др., 2016). Данные по валовому содержанию (мкг/г) тяжёлых металлов (Li, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, Pb) в почвах мониторинговых площадок (см. *табл. 3*) на территории заповедника были взяты из работы (Бакунович

и др., 2016). В качестве меры концентрации фотосинтетически активной биомассы на мониторинговых площадках, каждой из которых был поставлен в соответствие один пиксель, использован вегетационный индекс NDVI, значения которого находили по материалам Landsat-8, полученным из открытого источника https://earthexplorer.usgs.gov. Временную динамику и закономерности пространственного изменения концентрации фотосинтетически активной биомассы q моделировали с использованием решения, полученного ранее в работе (Гендугов, Глазунов, 2014) в рамках представлений сплошной среды:

$$q = \alpha (tz)^{-B} \exp\left(\frac{-\kappa}{tz}\right). \tag{1}$$

Руководствуясь требованиями к сплошной среде для целей моделирования в рамках законов сохранения механики и макроскопической химической и биохимической кинетики (Седов, 1970), в качестве сплошной среды приняли поверхностный, достаточно представительный для поддержания растений слой почвы, наделённый свойством поддерживать те химические и биохимические реакции, которые в действительности протекают в почве, ризосфере и растительных клетках корней, стеблей и листьев, и содержать промежуточные (q в уравнении (1)) и конечные продукты этих реакций. Наделение NDVI свойством представлять q в уравнении (1) предполагает знание коэффициента перехода от модельной концентрации фотосинтетически активной биомассы q (кг/кг) в представительном слое почвы к её фактическому содержанию на единице поверхности ($\kappa \Gamma/M^2$), а от неё — к собственно NDVI. Концентрация биомассы на единице поверхности почвы легко вычисляется на основе модельной концентрации q в почве с использованием плотности почвы и толщины её представительного слоя. В то же время переход от биомассы на единице поверхности к NDVI, зависящий не только от биомассы, но и от её состава и структуры, а также от условий съёмки, является предметом многочисленных исследований. Полагая в первом приближении эти коэффициенты константами модели для каждого пикселя, их включили в коэффициенты масштаба λ и Λ уравнений (2) и (3) соответственно, что открывает возможность прямого применения (q = NDVI) этих теоретических уравнений к анализу варьирования данного вегетационного индекса.

Коэффициенты уравнения (1) представляют собой свёртки стехиометрических коэффициентов химических и биохимических реакций, определяющих динамику концентрации фотосинтетически активной биомассы q, а выражение для результирующей z (мкг/г) начальных концентраций c_{i1}° компонентов субстрата (тяжёлых металлов, перечисленных выше) имеет вид: $z = \sqrt{\prod_{i=1}^{n} \left(c_{i1}^{\circ}\right)}$. Поскольку среднее геометрическое из начальных концентраций всех компонентов субстрата для каждой мониторинговой площадки постоянно, z = const, его введение в константы уравнения (1) $\alpha z^{-B} = \lambda$ и $\varkappa/z = k$ приводит к формуле зависимости показателя

концентрации фотосинтетически активной биомассы от времени:
$$q = \lambda \cdot \mathrm{e}^{-k/t} \cdot t^{-B}. \tag{2}$$

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

Введение в константы уравнения (1) зафиксированного времени, $\Lambda = \alpha(t)^{-B}$ и $K = \varkappa/t$, приводит к формуле дозовой зависимости в фазовом пространстве зависимости концентрации фотосинтетически активной биомассы от результирующей z концентрации компонентов субстрата:

$$q = \Lambda \cdot e^{-K/z} \cdot z^{-B}. \tag{3}$$

В этом уравнении Λ — масштабирующий коэффициент; K — коэффициент «скорости» увеличения концентрации фотосинтетически активной биомассы в результате увеличения результирующей концентрации компонентов субстрата z; B — коэффициент «скорости» убывания концентрации фотосинтетически активной биомассы в ответ на увеличение результирующей концентрации компонентов субстрата z.

Рабочая гипотеза исследования состояла в следующих утверждениях:

- 1) динамика вегетационного индекса на любой площадке заповедника размером в один пиксель в течение вегетационного периода подчиняется уравнению (2), а константы и особые точки этого уравнения являются индивидуализирующими характеристиками площадки (пикселя) в данном сезоне;
- 2) для любой фиксированной даты наблюдения в окрестностях горно-обогатительного комбината, являющегося источником загрязнения окружающей среды постоянным набором тяжёлых металлов (Бакунович и др., 2016), вегетационный индекс при прочих, помимо степени загрязнения, одинаковых условиях закономерно изменяется по территории, соответствующей отобранным по критериям сходства коэффициентов модели динамики пикселям, в зависимости от их концентрации в почве по уравнению (3), константы и особые точки которого являются индивидуализирующими характеристиками отклика фотосинтетически активной биомассы растительного покрова (через посредство вегетационного индекса) на концентрацию *z* загрязняющих почву тяжёлых металлов данного набора в данном сезоне на территории отобранных пикселей.

Выявление индивидуализирующей роли конкретного сочетания начальных концентраций указанных тяжёлых металлов (стрессора) в форме их среднего геометрического z возможно лишь на фоне равенства прочих, помимо содержания тяжёлых металлов, факторов, определяющих тип растительности, присущую ей фотосинтетически активную биомассу и её динамику. Согласно данным из работы (Бакунович и др., 2016), содержание углерода органического вещества в верхнем пятисантиметровом слое почв мониторинговых площадок, варьирующее в диапазоне от 2,06 до 3,69 %, а также низкие значения удельной скорости базального дыхания свидетельствуют об одинаковости качества органического вещества этих почв, относящихся к одному биоклиматическому ряду. Показатель кислотности в почвах площадок варьирует в пределах от 5,0 до 6,4 ед. рН, т.е. эти почвы характеризуются слабокислой, близкой к нейтральной, и нейтральной реакциями среды. Почвы мониторинговых площадок характеризуются близким гранулометрическим составом, попадая в диапазон от средне- до тяжелосуглинистых с содержанием физической глины от 42 до 54 %. Все эти почвы, за двумя исключениями, практически не различаются по величине метаболического коэффициента qCO $_2$, который изменяется от 0,052 до 0,143, что свидетельствует о наличии весьма слабых признаков угнетения и нарушения микробных сообществ.

По данным радарной съёмки из источника http://srtm.csi.cgiar.org/ построили карты высот ($puc.\ 1$, см. с. 115), крутизны и экспозиции склонов (не приведены), из которых следует, что все мониторинговые площадки, за исключением № 5, где крутизна склона составила 7°, располагаются на слабопокатых, очень пологих и пологих склонах разной экспозиции крутизной менее 5°, что позволяет в первом приближении пренебречь этими различиями и объединить их в одну категорию по инсоляции. Все мониторинговые площадки располагаются на склонах в транзитном положении относительно линий поверхностного стока и не подвергаются избыточному увлажнению. Лишь на одной площадке (№ 11) в профиле сверхмощного чернозёма на овражно-балочных наносах присутствуют следы оглеения, свидетельствующие о периодическом переизбытке влаги. Максимальный перепад абсолютных высот между площадками достигает 65 м, обеспечивая пренебрежимо малую (порядка $0,4^\circ$) максимальную разницу в температурах за счёт перепада высот.

Опираясь на приведённые сведения о генетической принадлежности, химических, физических и биологических свойствах почв мониторинговых площадок и закономерностях их расположения в рельефе, в качестве первого приближения приняли, что почвенные и температурно-

влажностные условия мониторинговых площадок, за исключением содержания в них тяжёлых металлов, можно считать одинаковыми по их способности поддерживать растительные сообщества, а различия между ними в закономерностях сезонной динамики NDVI могут быть объяснены разницей в степени загрязнения почвы мониторинговых площадок тяжёлыми металлами.

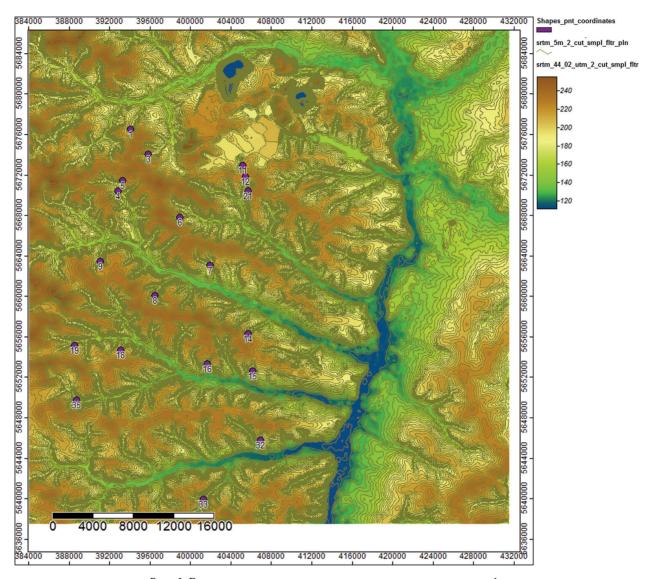


Рис. 1. Расположение мониторинговых площадок в рельефе

Обработку материалов дистанционного зондирования и подготовку картографического материала проводили с использованием свободно распространяемой ГИС SAGA (Conrad et al., 2015). Коэффициенты уравнений (2) и (3) получили приближением этих уравнений к экспериментальным данным по способу наименьших квадратов с использованием доступных пакетов прикладных программ для ПЭВМ (http://zunzun.com/). Для иллюстрации точности приближения модели на графиках, приведенных в настоящей работе, наряду с теоретической кривой и экспериментальными точками синим пунктиром показаны 95%-е доверительные интервалы. Наличие коэффициентов модели дало возможность вычислить особые точки путём анализа производных первого, второго и третьего порядков от вегетационного индекса по времени и по результирующей концентрации тяжёлых металлов в почве с использованием свободно распространяемого пакета программ компьютерной алгебры Махіта (https://sourceforge.net/projects/maxima/).

Результаты и их обсуждение

Уравнение (2), полученное в предположении постоянства z (результирующей из начальных концентраций перечисленных тяжёлых металлов, рассматриваемых в качестве стрессора), которая в этом случае учитывается константами модели, адекватно экспериментальным данным по сезонной динамике вегетационного индекса на всех мониторинговых площадках и в 2015, и в 2016 г. (рис. 2, 3, см. с. 117, 118). Это дало возможность получить коэффициенты модели, что, в свою очередь, позволило решением уравнений первой, второй и третьей производных от вегетационного индекса по времени определить шесть особых точек, разграничивающих семь фаз роста, характеризуемых собственным сочетанием состояний макрокинетических характеристик (концентрации фотосинтетически активной биомассы, характеризуемой значением NDVI, а также скоростей и ускорений её роста) (maбл. 1, 2). Об исключительно высокой точности коэффициентов модели (2) для всех мониторинговых площадок свидетельствует малый разброс экспериментальных точек вокруг теоретической кривой — практически все они вошли в 95%-й доверительный интервал (см. рис. 2 и 3). Отличительной особенностью уравнения (2) является то, что его правая часть стремится к нулю как при стремлении времени к нулю, так и к бесконечности, что не противоречит общебиологическим представлениям.

Причиной обращающего на себя внимание различия в коэффициентах масштаба для (2) и (3) может быть особенность структуры решения (1), в котором независимые переменные входят в знаменатели и первого члена, и экспоненты. Такая структура есть результат поиска аналитического решения исходной системы дифференциальных уравнений модели (в данной статье не приводится). Нахождение теоретического решения (1) задачи моделирования наблюдаемой в природе и эксперименте колоколообразной динамики роста биомассы (при постоянстве начальных концентраций компонентов субстрата) и колоколообразного макроскопического отклика живого на микроскопические количества смеси реагентов (при постоянстве времени) оказалось возможным (Гендугов, Глазунов, 2014) в рамках законов сохранения механики, макроскопической химической и биохимической кинетики, представлений сплошной среды и использования теории подобия и анализа размерности (Седов, 1970) лишь только в результате удачного подбора структуры коэффициента скорости химических и биохимических реакций, определяющих рост (здесь не приводится). Этот коэффициент должен был обеспечить в аналитическом решении модели, которое и было получено в виде (1) (Гендугов, Глазунов, 2014), учёт регулирующего влияния ведущих компонентов субстрата, содержащихся в весьма малых концентрациях, например 3.10^{-7} кг/кг в случае с Cd (*табл. 3*), при весьма широком их соотношении; например, отношение максимальной концентрации Ва к минимальной концентрации Cd имеет порядок 10^3 (см. *табл. 3*). Как следствие, независимые переменные входят в знаменатели и первого члена, и экспоненты, что и приводит к столь большим различиям в коэффициентах масштаба при малых изменениях независимой переменной.

Степень адекватности уравнения (3), полученного в предположении постоянства $(t=\mathrm{const})$ срока учёта NDVI, который в этом случае включается в константы модели, экспериментальным данным по зависимости вегетационного индекса от результирующей z начальных концентраций c_{i1}° шестнадцати перечисленных тяжёлых металлов в почвах мониторинговых площадок менялась в течение сезона и в 2015, и в 2016 г. (рис. 4, 5, см. с. 119, 121), соответственно этому менялась и точность коэффициентов модели. Для трёх сроков наблюдения из одиннадцати в 2015 г. и для пяти сроков из девяти в 2016 г. дозовая зависимость отклонялась от ожидаемой (3), но реализовывалась в соответствии с уравнением (3) при отрицательных коэффициентах K и B, т.е. в соответствии с иным законом. Тем не менее ожидаемая зависимость (3) неизменно устанавливалась к середине вегетационного сезона. Для всех случаев её реализации были определены коэффициенты модели (см. maбn. 3). Наибольшая точность коэффициентов модели (3) в 2015 г. была достигнута на 32-й неделе, когда в 95%-й доверительный интервал попало 9 из 11 опытных точек, а в 2016 г. — на 30-й неделе (11 точек из 15).

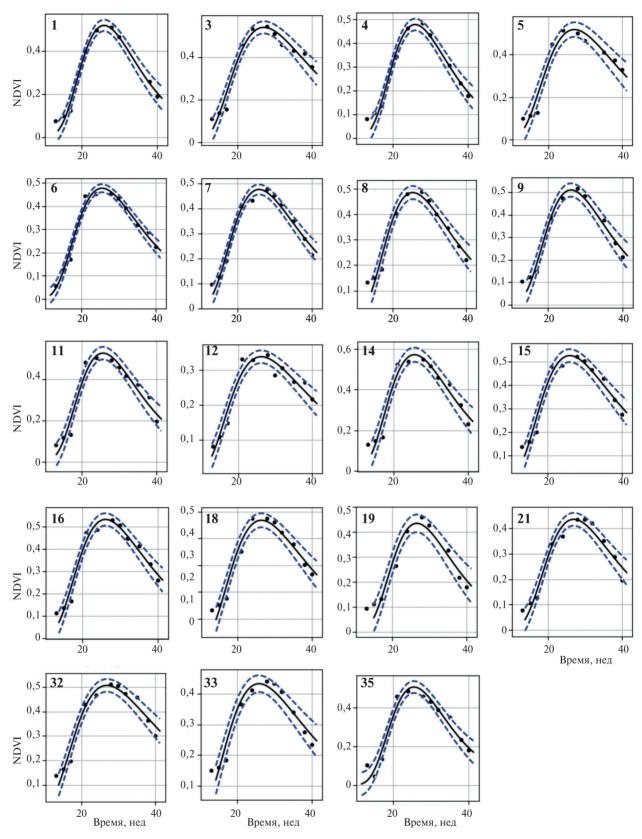


Рис. 2. Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI на мониторинговых площадках заповедника «Ямская степь» в 2015 г. Цифры в левом верхнем углу каждого рисунка — код площадки (Бакунович и др., 2016), точки — эксперимент, сплошные линии — по уравнению (5) модели, пунктирные линии — доверительные интервалы для модели

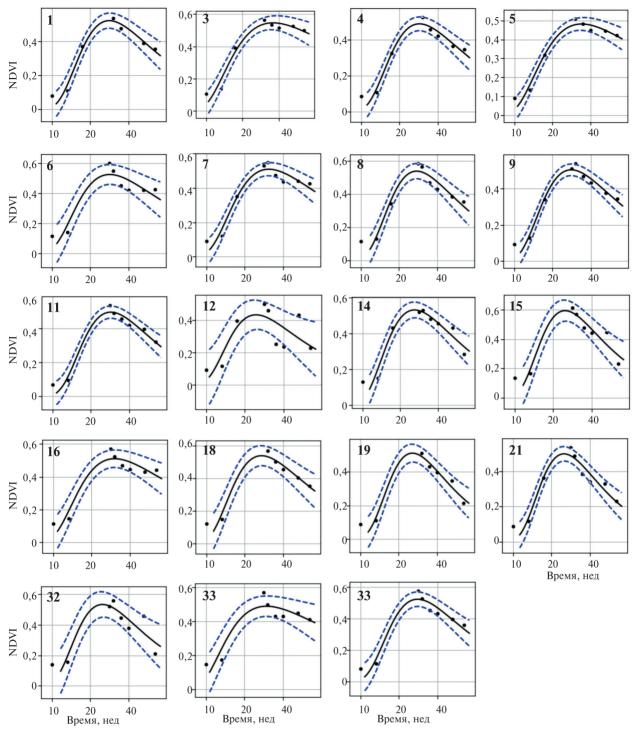


Рис. 3. Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI на мониторинговых площадках заповедника «Ямская степь» в 2016 г. Цифры в левом верхнем углу каждого рисунка — код площадки (Бакунович и др., 2016), точки — эксперимент, сплошные линии — по уравнению (5), пунктирные линии — доверительные интервалы для модели

Наличие коэффициентов модели позволило анализом первой, второй и третьей производных от вегетационного индекса по результирующей z начальных концентраций тяжёлых металлов в почве найти шесть особых точек, разграничивающих семь промежутков в фазовой плоскости зависимости показателя роста (q = NDVI) от результирующей концентрации стрессора z. Поскольку каждый из этих промежутков характеризуется собственным сочетанием состояний «макрокинетических» характеристик отклика биологической системы (NDVI)

на действие стрессора, значения результирующих концентраций z, равно как и значения отклика (NDVI), соответствующие особым точкам, можно использовать в качестве опорных при ранжировании загрязнённой территории по степени отклика на действие стрессора (при условии выполнения требования равенства прочих определяющих факторов).

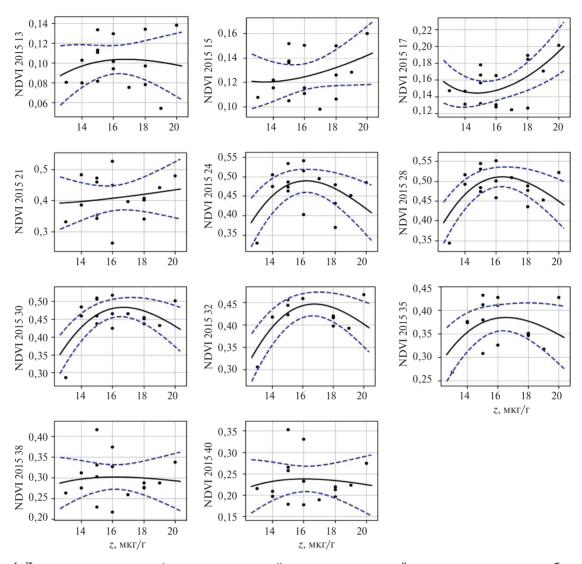


Рис. 4. Дозовые зависимости (от результирующей концентрации тяжёлых металлов в почве, абсцисса) вегетационного индекса NDVI (ордината) по материалам 2015 г. (Бакунович и др., 2016) (дата определения, в неделях, указана на ординате) для заповедника «Ямская степь». Точки соответствуют мониторинговым площадкам, сплошные линии — уравнению (6), пунктирные линии — доверительным интервалам для модели

Таблица 1. Параметры и особые точки уравнения (2) сезонной динамики вегетационного индекса NDVI 2015 г. для мониторинговых площадок в заповеднике «Ямская степь»

Площадка, №	λ	В	k	t_1	t_2	t_3	t_4	<i>t</i> ₅	<i>t</i> ₆
1	4,4558E+20	11,3	294,21	15	19	23	26	33	40
3	1,13383E+12	6,6	178,98	13	17	23	27	37	46
4	1,43262E+20	11,1	287,77	15	19	23	26	33	40
5	1,21225E+13	7,2	193,96	13	18	23	27	37	45
6	1,26601E+15	8,4	214,14	13	17	22	26	34	41
7	1,72088E+14	7,9	203,57	13	17	22	26	34	42
8	8,40699E+13	7,7	197,22	13	17	22	25	34	42

Окончание табл. 1

Площадка, №	λ	В	k	t_1	t_2	t_3	t_4	t ₅	t ₆
9	2,22861E+17	9,5	249,76	14	18	23	26	34	42
11	2,88441E+17	9,6	247,36	14	18	23	26	34	41
12	1 030 048 8106	5,7	148,39	12	16	21	26	36	46
14	5,98236E+15	8,7	222,78	13	17	22	26	34	41
15	1,3584E+12	6,7	174,69	12	17	22	26	35	44
16	2,39318E+14	7,9	206,95	13	17	22	26	35	43
18	6,54977E+11	6,5	173,02	12	17	22	26	36	45
19	5,89194E+18	10,3	274,31	15	19	24	27	35	42
21	1,36096E+15	8,3	224,30	14	18	23	27	36	44
32	25 598 603 871	5,7	154,57	12	17	22	27	37	47
33	48 121 697 048	6,0	154,83	12	16	21	26	36	45
35	9,40488E+19	11,0	281,19	14	18	23	26	33	39

Таблица 2. Параметры и особые точки уравнения (2) сезонной динамики вегетационного индекса NDVI 2016 г. для мониторинговых площадок в заповеднике «Ямская степь»

Площадка, №	λ	В	k	t_1	t_2	t_3	t_4	t ₅	t_6
1	1,73198E+11	6,3	157,25	12	16	21	25	34	43
3	783 228,5986	3,3	92,73	10	15	20	28	42	55
4	1,91265E+11	6,3	159,24	12	16	21	25	35	43
5	5 212 185,434	3,7	103,89	10	15	21	28	40	52
6	612 941 042,9	4,9	124,24	11	15	20	25	35	45
7	255 097 067,1	4,7	123,46	11	15	21	26	37	48
8	2,81212E+12	7,0	171,73	12	16	21	25	33	41
9	1,23954E+11	6,2	154,99	11	16	21	25	34	43
11	1,95226E+12	6,9	173,00	12	16	21	25	34	42
12	27 963 592 219	6,0	137,98	10	14	19	23	32	40
14	18 487 714 512	5,8	138,58	11	15	19	24	33	41
15	2,67229E+13	7,6	175,44	11	15	20	23	31	38
16	23 406 329,78	4,1	107,91	10	15	20	26	38	48
18	19 633 438 029	5,8	141,48	11	15	20	24	34	42
19	2,01856E+15	8,6	203,79	12	16	20	24	31	38
21	1,26256E+15	8,6	199,09	12	16	20	23	31	38
32	7,36107E+11	6,7	156,61	11	15	19	23	32	39
33	325 369,0877	3,2	81,31	9	13	18	26	38	50
35	4,49143E+11	6,5	162,19	12	16	21	25	34	42

Таблица 3. Содержание тяжёлых металлов (мкг/г) валовых форм в поверхностном слое 0-5 см почв мониторинговых площадок в заповеднике «Ямская степь» из работы (Бакунович и др., 2016) и рассчитанное нами среднее геометрическое значение (z)

Площадка, №	Pb	Ba	Cs	Sb	Sn	Cd	Mo	Zr	Sr	As	Zn	Cu	Ni	Co	Cr	V	Li	z
1	24	390	4,0	2,3	3,6	0,4	1,1	180	100	6,7	67	25	32	9,5	57	110	26	17
3	21	340	4,1	0,6	2,5	0,3	1,0	160	91	7,1	57	18	29	9,5	54	110	27	15
4	23	360	4,4	0,5	2,5	0,3	0,9	160	110	5,7	63	18	31	11	55	120	29	15
5	24	360	4,2	0,6	2,3	0,3	1,4	160	150	7,1	75	19	32	12	56	120	21	16
6	30	400	3,8	1,9	12	0,7	0,9	180	100	6,4	74	20	30	11	50	110	26	19
7	27	440	3,6	0,9	5,5	0,6	1,1	210	110	4,6	80	31	31	12	51	110	22	18
8	24	380	4,6	0,7	3,5	0,3	0,9	170	93	7,6	97	37	37	11	59	130	35	18
9	22	350	3,7	0,6	2,5	0,3	0,8	180	91	5,7	54	28	28	9,2	53	110	27	14

		_	2
кони	пино	таба	3

Площадка, №	Pb	Ba	Cs	Sb	Sn	Cd	Mo	Zr	Sr	As	Zn	Cu	Ni	Со	Cr	V	Li	z
11	18	320	3,3	0,7	1,9	0,4	1,7	140	110	4,9	78	26	26	8,3	71	63	18	14
12	22	310	3,7	0,5	2,6	0,4	0,8	110	68	5,1	47	18	25	8,0	42	90	26	13
13	21	300	3,5	0,5	2,3	0,3	0,8	110	68	5,8	45	17	25	8,0	46	90	22	12
14	26	410	4,3	0,6	2,7	0,4	1,2	170	110	6,1	57	20	34	8,7	54	120	27	16
15	28	420	4,1	1,9	6,4	0,5	1,0	200	170	6,2	85	25	35	13	55	110	24	20
16	24	420	3,7	0,6	2,3	0,3	1,0	210	110	6,0	61	22	32	13	53	110	22	15
18	22	330	4,4	0,7	2,6	0,3	0,9	140	92	8,4	63	21	36	11	55	120	29	15
19	24	400	4,3	0,6	2,5	0,3	0,9	180	100	7,6	58	19	34	12	57	120	29	16
21	20	390	3,9	0,7	2,5	0,3	3,0	230	110	7,8	73	34	38	11	94	89	21	18

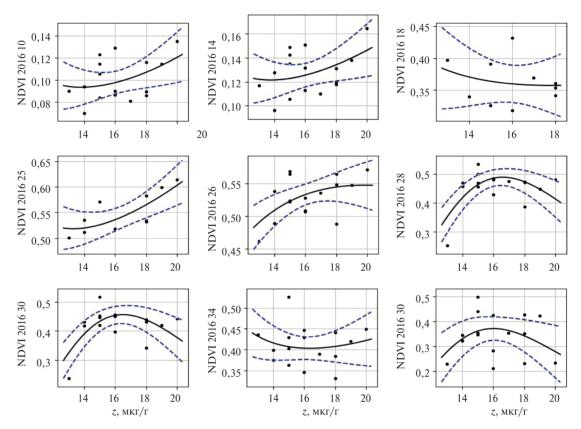
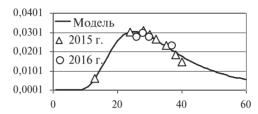


Рис. 5. Дозовые зависимости (от результирующей концентрации тяжёлых металлов в почве, абсцисса) вегетационного индекса NDVI (ордината) по материалам 2016 г. (Бакунович и др., 2016) (дата определения, в неделях, указана на ординате) для заповедника «Ямская степь». Точки соответствуют мониторинговым площадкам, сплошные линии — уравнению (6), пунктирные линии — доверительным интервалам для модели

Концентрация z_4 , соответствующая максимуму отклика вегетационного индекса $q_4 = \mathrm{NDVI}$, характеризуется слабым внутрисезонным и межгодовым варьированием ($\mathit{maбл.}\ 4$) вокруг своего двухлетнего среднего, равного 16,7 мкг/г. В то же время основанная на ней макрокинетическая характеристика q_4/z_4 подчиняется закономерной динамике, общей для 2015 и 2016 гг. ($\mathit{puc.}\ 6$, см. с. 122), с максимумом на 25-й неделе от начала года, что подтверждает равенство прочих (помимо концентрации в почвах стрессоров) условий для всех участков мониторинга.

Определяющее влияние концентрации z_4 на общность сезонной динамики вегетационного индекса проявляется и в характере экспериментальной зависимости времени достижения вегетационным индексом NDVI своего сезонного максимума на каждой мониторинго-

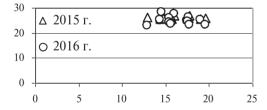
вой площадке от результирующей концентрации тяжёлых металлов в почве этой площадки (puc. 7) для всех мониторинговых площадок заповедника в течение двух сезонов. Для данной зависимости характерно наличие общего, слабо заметного, максимума при ординате порядка 25 и абсциссе порядка 16,7. То есть в фазовой плоскости зависимости времени достижения максимума NDVI от результирующей концентрации z тяжёлых металлов в почве его увеличение в области малых значений z приводило к отдалению срока достижения сезонного максимума NDVI (и фотосинтетически активной биомассы) на площадке, а в области больших — к приближению. Изменение в тенденции приурочено к значению результирующей концентрации z порядка 16,7 мкг/г. Подобная закономерность прослеживается и в отношении других макрокинетических характеристик, а именно особых точек t_1 и t_6 (puc. 8, 9) и показателя скорости достижения максимума q_4/t_4 (puc. 10).



 $Puc.\ 6$. Динамика показателя макроскопической кинетики отклика растительного покрова на загрязнение тяжёлыми металлами для сезонов 2015 и 2016 гг. в заповеднике «Ямская степь». По ординате — отношение максимального по всей территории заповедника значения NDVI для данного срока к оптимальному для него значению результирующей концентрации тяжёлых металлов в почве, q_4/z_4 ; по абсциссе — время, в неделях. Точки на графике соответствуют срокам определения NDVI, линия — по уравнению (2) модели

20

△ 2015 г.



Puc. 7. Зависимость времени (в неделях) достижения вегетационным индексом NDVI своего сезонного максимума на мониторинговой площадке (ордината) от результирующей концентрации тяжёлых металлов в почве площадки (абсцисса, мкг/г) $t_4 = f(z)$ для заповедника «Ямская степь». Точки на графике соответствуют мониторинговым площадкам

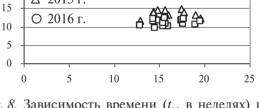
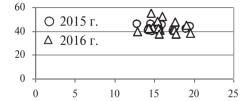
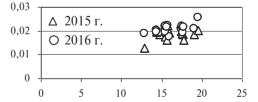


Рис. δ . Зависимость времени (t_1 , в неделях) начала активного роста вегетационного индекса NDVI на мониторинговой площадке (ордината) от результирующей концентрации тяжёлых металлов в почве площадки (абсцисса, мкг/г) для заповедника «Ямская степь». Точки на графике соответствуют мониторинговым площадкам



 $Puc.\ 9.$ Зависимость времени достижения вегетационным индексом NDVI на мониторинговой площадке момента завершения его активного убывания (t_6 , в неделях, ордината) от результирующей концентрации тяжёлых металлов в почве площадки (абсцисса, мкг/г) для заповедника «Ямская степь». Точки на графике соответствуют мониторинговым площадкам



 $Puc.\ 10.$ Зависимость скорости достижения индексом NDVI сезонного максимума для мониторинговой площадки (ордината) от результирующей концентрации тяжёлых металлов $q_4/t_4=f(z)$ в почве площадки (абсцисса, мкг/г) для заповедника «Ямская степь» (точки на графике соответствуют мониторинговым площадкам)

Год	Неделя	Λ	В	K	q_{4}/t_{4}	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6
2015	13	278 218,1	4	65	0,01	6,3	9,2	12,5	16,8	24,4	31,6
	24	1,18E+12	8	122	0,03	8,0	10,6	13,8	16,2	21,7	26,8
	28	1,37E+11	7	114	0,03	7,9	10,6	13,8	16,4	22,2	27,6
	30	1,31E+12	8	125	0,03	8,3	11,0	14,2	16,7	22,4	27,6
	32	3,25E+11	7	120	0,03	8,2	10,9	14,1	16,8	22,6	28,0
	35	1,71E+09	6	97	0,02	7,4	10,2	13,5	16,5	22,9	28,7
	38	86,21018	1	24	0,02	3,4	5,9	8,7	16,2	26,5	36,5
	40	3177,799	3	40	0,01	4,8	7,5	10,6	16,0	24,6	32,8
2016	26	36,84956	1	21	0,03	3,3	6,0	9,0	19,9	33,7	47,7
	28	2,96E+16	10	168	0,03	9,1	11,6	14,7	16,6	21,6	26,1

Таблица 4. Параметры и особые точки уравнения модели (3) зависимости вегетационного индекса NDVI от результирующей концентрации тяжёлых металлов в почве для двух сезонов в заповеднике «Ямская степь»

Абсциссы остальных, помимо z_4 , особых точек уравнения (3) (см. *табл. 3*) также слабо варьируют вокруг своих средних, которые могут быть использованы для целей нормирования содержания z тяжёлых металлов в почве, поскольку они являются границами диапазонов концентрации z с собственным для каждого диапазона сочетанием состояний макрокинетических характеристик отклика NDVI на результирующую концентрацию z тяжёлых металлов.

0.03

0,02

9.3

9.3

11,7

11.7

14,7

14.5

16,5

16,0

21,3

20,4

25,4

24,2

Константы уравнения (2) и границы фаз роста, найденные по особым точкам (см. $maбл.\ 1$ и 2), характеризуются слабой межгодовой изменчивостью, которая выявляется в результате их сопоставления по пунктам мониторинга за два года. Межгодовая разница в величинах констант скорости роста и констант скорости отмирания достигала $50\,\%$, что может быть следствием действия внешних факторов, не менявших, однако, существенно свойства растительных сообществ, определяющие NDVI, и концентрацию z металлов в почве. Такими факторами могли быть температурно-влажностные характеристики сезона, неявно входящие в константы модели (2). При этом в $2016\ r.$ и константы скорости роста, и константы скорости отмирания в целом были меньше, чем в $2015\ r.$

В поддержку предположения о том, что свойства растительных сообществ, определяющие NDVI, и концентрация z тяжёлых металлов в почве на площадках мониторинга в 2016 г. не изменились существенно по сравнению с 2015 г., свидетельствует общность сезонной динамики такого показателя, как q_4/z_4 , который является количественной мерой оптимальности результирующей концентрации z тяжёлых металлов в почвах пунктов мониторинга на территории заповедника (см. puc. 6).

Сезонная динамика и пространственная изменчивость фотосинтетически активной биомассы, мерой которой выбран NDVI, исследованы в рамках оригинальной модели, основанной на законах сохранения механики, химической и биохимической макроскопической кинетики, представлениях сплошной среды с использованием теории подобия и анализа размерности. Согласно теории, на основе которой получены аналитические решения задачи о ходе роста (2) и об отклике показателя роста на начальные концентрации компонентов субстрата (3), ход роста растительности определяется химическими и биохимическими реакциями, стехиометрические коэффициенты которых входят в константы модели, имеющие структуру, описанную в работе (Гендугов, Глазунов, 2014). Поскольку и температура, и влажность оказывают влияние на скорость этих реакций, температурно-влажностные условия сезонов на участках мониторинга неявно входят в константы модели. Отсюда следует, что их нельзя вычленить и нельзя устранить их влияние. Такая особенность модели обеспечивает определённые преимущества при её использовании для целей изучения закономерностей пространственной и временной изменчивости растительного покрова по данным дистанционного зондирования. В частности, константы модели роста фотосинтетически активной биомассы

30

37

5,96E+17

9,59E+19

11

12

181

200

в течение сезона, мерой которой принята величина NDVI, и иные макрокинетические показатели роста, являются индивидуализирующими характеристиками пикселя для данного сезона, что открывает возможности для внутрисезонной классификации пикселей на объективной основе и для последующего анализа закономерностей пространственной и временной изменчивости в пределах выделенных классов и между ними.

В случае с материалами дистанционного зондирования мониторинговых площадок близость констант модели роста (за исключением константы масштаба) и других макрокинетических характеристик роста (шести особых точек, находимых анализом производных) для исследованных пикселей (на примере двух сезонов) дала основание для заключения о том, что почвенно-растительные и температурно-влажностные условия на местности для этих пикселей близки и они могут быть объединены в один массив (для фиксированного времени наблюдения в каждом сезоне) с целью анализа концентрационной зависимости. В объединённом массиве температурно-влажностные условия на указанных выше основаниях входят в константы модели отклика (в фазовой плоскости зависимости отклика (в форме NDVI) от начальных концентраций компонентов субстрата), и их нельзя вычленить, равно как нельзя устранить их влияние. Такая особенность модели обеспечивает определённые преимущества при её использовании для целей изучения закономерностей отклика растительности на загрязнение тяжёлыми металлами по данным дистанционного зондирования. Действительно, в случае с материалами дистанционного зондирования мониторинговых площадок константы модели отклика являются индивидуализирующими характеристиками всей территории мониторинга (всей совокупности исследованных пикселей) для данного сезона. Близость этих индивидуализирующих констант (за исключением коэффициента масштаба) для каждого из двух исследованных сезонов подтверждает обоснованность объединения всех пикселей мониторинговых площадок в один массив на основе предположения о сходстве их почвеннорастительных и температурно-влажностных условий.

Выводы

- 1. Сезонная динамика вегетационного индекса NDVI на всех мониторинговых площадках в заповеднике «Ямская степь», расположенном в зоне влияния горно-обогатительного комбината, подчиняется уравнению (2), причём константы и особые точки уравнения являются индивидуализирующими характеристиками площадок в данном сезоне.
- 2. Пространственная изменчивость вегетационного индекса NDVI в пределах части обследованной территории, сравнительно однородной по типу почв, крутизне и экспозиции склонов, загрязнённой установленным набором тяжёлых металлов, сочетающихся в почве в разных концентрациях, определяется их начальным содержанием и подчиняется уравнению (3), константы и особые точки которого являются индивидуализирующими характеристиками отклика растительного покрова (через посредство вегетационного индекса) на концентрацию тяжёлых металлов данного набора, загрязняющих почву.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-34-00037 мол а.

Литература

- 1. *Бакунович Н.О., Хохлова О.С., Мякшина Т.Н., Русаков А.В., Шаповалов А.С.* Загрязнение тяжелыми металлами и дыхательная активность микроорганизмов в нативных почвах и искусственных субстратах (на примере заповедного участка «Ямская степь») // Бюл. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева. 2016. № 85. С. 131—149.
- 2. *Барталев С.А.*, *Лупян Е.А.* Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 197—214.

- 3. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- 4. *Гендугов В. М., Глазунов Г. П.* Макрокинетическая модель микробного роста на многокомпонентном субстрате // Вестн. Московского ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2014. № 3. С. 10—16.
- 5. *Гендугов В. М.*, *Глазунов Г. П.*, *Евдокимова М. В.*, *Шестакова М. В.* Макрокинетическое обоснование модели микробного роста при одном ведущем компоненте субстрата // Вестн. Московского ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2013. № 2. С. 25—30.
- 6. *Глазунов Г. П.*, *Гендугов В. М.*, *Харчук О. А*. Макрокинетическая модель роста, учитывающая лимитирующий компонент субстрата // Всерос. науч. конф. с международным участием «Инновационные направления современной физиологии растений»: сб. тез. 2013. С. 48–49.
- 7. *Жукова Е.Ю.*, *Шевырногов А.П.*, *Жукова В.М.*, *Зоркина Т.М.*, *Пугачева И.Ю*. Сезонная динамика продуктивности агроценозов юга Минусинской котловины // Вестн. Томского гос. ун-та. 2009. № 323. С. 354—357.
- 8. *Медведева М.А.*, *Елсаков В.В.*, *Савин И.Ю.*, *Барталев С.А.* О связи фенологического развития растительности таежной зоны с величиной NDVI, определенной по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 319—329.
- 9. *Медведева М.А.*, *Савин И.Ю.*, *Барталев С.А.*, *Лупян Е.А.* Использование данных NOAA-AVHRR для выявления многолетней динамики растительности Северной Евразии // Исследование Земли из космоса. 2011. № 4. С. 55–62.
- 10. *Пугачева И. Ю.*, *Шевырногов А. П.* Изучение динамики NDVI посевов сельскохозяйственных культур на территории Красноярского края и республики Хакасия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. С. 347—351.
- 11. Русаков А. В. Почвы и почвенный покров Ямской степи. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2012. 216 с.
- 12. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1970. 492 с.
- 13. *Терехин Э.А.* Применение дискриминантного анализа для распознавания посевов сельскохозяйственных культур // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 89−99.
- 14. *Conrad O.*, *Bechtel B.*, *Bock M.*, *Dietrich H.*, *Fischer E.*, *Gerlitz L.*, *Wehberg J.*, *Wichmann V.*, *Böhner J.*System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015.
 V. 8. P. 1991–2007.
- 15. *Jamali S.*, *Seaquist J.*, *Eklundh L.*, *Ardö J.* Automated mapping of vegetation trends with polynomials using NDVI imagery over the Sahel // Remote Sensing of Environment. 2014. № 141. P. 79–89.
- 16. *Sakamoto T.*, *Yokozawa M.*, *Toritani H.*, *Shibayama M.*, *Ishitsuka N.*, *Ohno H.* A crop phenology detection method using time-series MODIS data // Remote Sensing of Environment. 2005. № 96. P. 366–374.

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, R. P. Titarev, M. V. Shestakova

Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia E-mail: glazng@mail.ru

The approach to revealing the regularities of temporal and spatial variability of photosynthetically active biomass on the basis of data analysis (NDVI, Landsat 8) of remote sensing of the Earth using the theoretical equation derived earlier in the framework of the laws of conservation of mechanics and macroscopic chemical kinetics of living reacting systems is substantiated. It is shown that under the condition of introducing a constant for each monitoring site (pixel) of the resulting (in the form of geometric mean) initial concentration of heavy metals contained in the soil (Li, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, Pb) into the constants of the equation, the single-mode seasonal dynamics of the vegetation index is subjected to a theoretical equation, the constants and special points

of which are the individualizing characteristics of each site (pixel). If the fixed-time equation is introduced into the constants, the regularities of the spatial change of the vegetation index on the monitoring sites (pixels) with the same, in addition to the concentration of heavy metals, soil properties are reduced to the equation of dose dependence, the constants and special points of which are the individualizing characteristics of the response of photosynthetically active biomass (NDVI) to the resulting initial concentration in the soil of heavy metals of this set.

Keywords: remote sensing of the Earth, Landsat 8, NDVI, environmental monitoring, environmental regulation, macroscopic biokinetics, the law of biological growth, the law of tolerance, heavy metals, dose dependence, gormezis, MPC, soil quality regulation, seasonal dynamics of vegetation

Accepted: 29.03.2019 DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-111-127

References

- 1. Bakunovich N.O., Khokhlova O.S., Myakshina T.N., Rusakov A.V., Shapovalov A.S., Zagryaznenie tyazhelymi metallami i dykhatel'naya aktivnost' mikroorganizmov v nativnykh pochvakh i iskusstvennykh substratakh (na primere zapovednogo uchastka "Yamskaya step") (Heavy metal pollution and respiratory activity of microorganisms in native soils and artificial substrates (on the example of the protected area Yamskaya steppe)), *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva*, 2016, No. 85, pp. 131–149.
- 2. Bartalev S.A., Loupian E.A., Issledovaniya i razrabotki IKI RAN po razvitiyu metodov sputnikovogo monitoringa rastitel'nogo pokrova (The research and development of IKI on the development of methods for satellite monitoring of vegetation cover), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 197–214.
- 3. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Satellite mapping of vegetation cover in Russia), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
- 4. Gendugov V.M., Glazunov G.P., Makrokineticheskaya model' mikrobnogo rosta na mnogokomponent-nom substrate (Macrokinetic model of microbial growth on a multicomponent substrate), *Vestnik Moskov-skogo universiteta*, *Ser. 17*, *Pochvovedenie*, 2014, No. 3, pp. 10–16.
- 5. Gendugov V. M., Glazunov G. P., Evdokimova M. V., Shestakova M. V., Makrokineticheskoe obosnovanie modeli mikrobnogo rosta pri odnom vedushchem komponente substrata (Macrokinetic grounds for a model of microbial growth on a substrate with a single major component), *Vestnik Moskovskogo universiteta*, *Ser. 17, Pochvovedenie*, 2013, No. 2, pp. 25–30.
- 6. Glazunov G. P., Gendugov V. M., Kharchuk O. A., Makrokineticheskaya model' rosta, uchityvayushchaya limitiruyushchii komponent substrata (The macrocinetic growth model, which takes into account the limiting component of the substratum), *Innovatsionnye napravleniya sovremennoi fiziologii rastenii* (Innovative directions of modern plant physiology), Proc. All-Russia Scientific Conf. with International Participation, 2013, pp. 48–49.
- 7. Zhukova E. Yu., Shevyrnogov A. P., Zhukova V. M., Zorkina T. M., Pugacheva I. Yu., Sezonnaya dinamika produktivnosti agrotsenozov yuga Minusinskoi kotloviny (Seasonal dynamics of productivity of agricultural lands of South Minusinsk hollow), *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, No. 323, pp. 354–357.
- 8. Medvedeva M.A., Elsakov V.V., Savin I.Yu., Bartalev S.A., O svyazi fenologicheskogo razvitiya rastitel'nosti taezhnoi zony s velichinoi NDVI, opredelennoi po sputnikovym dannym (About the relationship of
 phenological development of the vegetation of the taiga zone with the magnitude of NDVI determined from
 satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 1,
 pp. 319–329.
- 9. Medvedeva M.A., Savin I. Yu., Bartalev S.A., Loupian E.A., Ispol'zovanie dannykh NOAA-AVHRR dlya vyyavleniya mnogoletnei dinamiki rastitel'nosti Severnoi Evrazii (Use of NOAA-AVHRR data to identify long-term vegetation dynamics in Northern Eurasia), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 4, pp. 55–62.
- 10. Pugacheva I. Yu., Shevyrnogov A. P., Izuchenie dinamiki NDVI posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na territorii Krasnoyarskogo kraya i respubliki Khakasiya (The study of the dynamics of NDVI of agricultural crops on the territory of Krasnoyarsk Krai and Republic of Khakassia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 2, pp. 347–351.

- 11. Rusakov A. V., *Pochvy i pochvennyi pokrov Yamskoi stepi* (Soils and soil cover of the Yamskaya Stepp reserve), Saint Petersburg: Izd-vo SPbGU, 2012, 216 p.
- 12. Sedov L. I., *Mekhanika sploshnoi sredy. Tom 1* (Continuum mechanics, Vol. 1), Moscow: Nauka, 1970, 492 p.
- 13. Terekhin E.A., Primenenie diskriminantnogo analiza dlya raspoznavaniya posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur (Application of discriminant analysis for recognition of crops), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 7, pp. 89–99.
- 14. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J., System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geoscientific Model Development*, 2015, Vol. 8, pp. 1991–2007.
- 15. Jamali S., Seaquist J., Eklundh L., Ardö J., Automated mapping of vegetation trends with polynomials using NDVI imagery over the Sahel, *Remote Sensing of Environment*, 2014, No. 141, pp. 79–89.
- 16. Sakamoto T., Yokozawa M., Toritani H., Shibayama M., Ishitsuka N., Ohno H., A crop phenology detection method using time-series MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 2005, No. 96, pp. 366–374.