

УДК 631.471

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЧВ И ПЛАНИРОВАНИЕ МАСШТАБА ИССЛЕДОВАНИЯ

Захарченко Александр Викторович¹,
zakh@tpu.ru

Алексеев Валерий Иванович²,
v_alekseev@ugrasu.ru

Ипатова Дарья Витальевна¹,
ipatovadasha@gmail.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Югорский государственный университет,
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

Актуальность. Неоднородность почв, как естественного происхождения, так возникшую под воздействием ходовых систем, необходимо соразмерять с масштабом исследования. Почвенный покров просеки санитарно-защитной зоны воздушной линии электропередачи рассматривается в качестве иерархической системы. В почвенном покрове присутствует как естественная неоднородность, так и деградированные антропогенные почвы. Учет деградированных земель – актуальная проблема.

Целью работы является установление иерархической структуры неоднородности почвенного покрова с помощью вейвлет-анализа и установление её взаимосвязи с размером почвенного индивидуума для определения масштаба исследования антропогенно-измененных дерново-подзолистых почв на малых дистанциях.

Методы исследования. Использован вейвлет-анализ на основе фазово-частотной характеристики, реализованный в пакете МАТЛАБ-7.1 функции гаусс-5 (sgau5). Вейвлет анализ последовательно сопоставляет колебательные циклы дискретной функции с циклом модельной. Модельный цикл последовательно меняет размер. В качестве дискретной функции использовано измерение мощности гумусового горизонта. Измерения мощности гумусового горизонта ($N=1826$) проведены на стенке траншеи длиной 67 м, пересекающей санитарно-защитную зону воздушной линии электропередачи 500 кВ. За основу определения размеров почвенного индивидуума взяты идеи Ф.И. Козловского с использованием Фурье-преобразования.

Результаты. Вейвлет анализ позволяет выявить иерархическую структуру неоднородности почвенного покрова санитарно-защитной зоны. Рассмотрена асимметрия фазово-частотной диаграммы почвенного покрова. Обоснован расчет линейных размеров почвенного индивидуума. Обоснованы и даны рекомендации определения масштабных эффектов при изучении антропогенных почв.

Выводы. При помощи вейвлет-анализа выявлена система иерархически вложенных циклов неоднородности почв, которые могут рассматриваться в качестве индивидуумов низших таксономических единиц почвенной классификации. Показана асимметрия фазово-частотной характеристики почвенной неоднородности. Установлено, что на разных уровнях иерархии частота встречаемости почвенных индивидуумов пропорциональна квадратному корню линейного размера. Определены зависимости между количеством циклов, размером и масштабом наблюдения. Обоснован расчет масштабной сетки наблюдения для изучения антропогенно-нарушенных почв санитарно-защитной зоны линейных объектов. При формировании сети мониторинговых наблюдений для типа дерново-подзолистых почв рекомендуется устанавливать расстояния между почвенными наблюдениями менее или равными размерам почвенного индивидуума – 450–500 м.

Ключевые слова:

Гумусовый горизонт, почвенный индивидуум, вейвлет, фазово-частотная, масштаб, иерархия, антропогенные почвы, проблема изменяющегося масштаба, МАUP, воздушная линия электропередачи 500 кВ.

Введение

Иерархическая концепция строения почв и почвенного покрова представляется этапом развития системного обобщения познаний об окружающей природе [1]. Современные математические методы и достижения в анализе изображений создают новые возможности для исследований в областях географии, биологии и почвоведения [2]. Вейвлет-анализ является примером такого метода, позволяющего изучать иерархическую структуру пространственно-временных циклов разнообразных процессов, сравнивая такие явления, как эрозия лессового плато в Китае и пятна на Солнце [3],

климатические циклы [4]. С его помощью возможен не только ретроспективный анализ закономерностей поведения переменной, но и прогноз её изменения в будущем [5].

Проблема иерархических уровней организации природных объектов не является чисто биологической или географической. Она присутствует во всех физических явлениях, имеющих пространственно-временную организацию. Например, в книге академика М.А. Маркова «О природе материи» через призму иерархичности рассматриваются основные энергетические уровни организации физического микромира [6].

В почвоведении проблема иерархической организации почвы широко обсуждалась в конце прошлого века, благодаря работам А.Д. Воронина, Б.Г. Розонова [7], Е.А. Дмитриева [8], Ф.И. Козловского и др. [9]. С тех времен существенно изменились представления о существовании проблемы, что создает необходимость соотносить современные знания свойств иерархических систем с характерными чертами неоднородности почвенного покрова.

За основу расчетов масштаба исследования взяты размеры почвенного индивидуума, который рассматривается Е.А. Дмитриевым [8] в качестве объекта почвенной классификации. Чем подробнее таксономия классификации, тем меньше размеры выделяемого индивидуума, тем больше частота пунктов наблюдений. По его мнению, актуален вопрос соотношения этих размеров с неоднородностью почвенного покрова, так как исследований по этой проблеме проведено недостаточно для методически обоснованных рекомендаций. Он удивляется отсутствию должного внимания к этой проблеме.

Целью работы является установление иерархической структуры неоднородности почвенного покрова с помощью вейвлет-анализа и установление её взаимосвязи с размером почвенного индивидуума для определения масштаба исследования антропогенно-измененных дерново-подзолистых почв на малых дистанциях.

Изучение иерархической неоднородности почв направлено на её практическое использование, так как является методической основой для обобщения разномасштабных исследовательских работ при картографировании земель, подтвержденных воздействием разнообразных факторов, в том числе техногенных.

Иерархическая концепция в естествознании

Первое наиболее последовательное обоснование иерархической организации природы сделано в публикации «Концепция интегративных уровней и биология» [10], в которой автор указывает, что законы, описывающие свойства каждого уровня интеграции, уникальны и кардинально меняются при переходе с одного уровня на другой. Он не связывал эти уровни с пространственно-временными иерархическими системами, хотя проблема влияния масштаба исследования на его результаты известна с 30-х годов прошлого века. Иерархические природные системы и эффекты масштаба окончательно объединены Опеншоу и Тейлером в 1979 г. [11] в проблему изменяющегося масштаба (MAUP – Modifiable areal unit problem). Количество статей по темам «Иерархические системы» и «MAUP» ежегодно возрастает, в среднем на 12–13 % с 1980 по 2000 г. [12]. Концепция получила развитие в различных отраслях биологии, географии [13, 2]. Большинство классификаций природных объектов построено на иерархическом принципе.

Ю.Г. Пузаченко [14] подробно рассматривает теоретические и прикладные аспекты проблемы. Феномен пространственной иерархической организации ландшафта открыт русскими географами в 1950-х гг. и теперь, по его мнению, является основой всех ландшафтных исследований.

Оказывается, что в пространстве и во времени данные агрегированы, поэтому в зависимости от масштаба и произвольных границ разбиения пространства на части результаты расчетов будут зависеть от способа разбиения. Масштабный эффект – зависимость от способа разбиения пространства и математического ожидания (I рода), дисперсии (II рода), асимметрии распределения (III рода) [15]. При переходе из крупного масштаба на более мелкий масштаб искажается форма полигонов. Кроме того, показано, что длина периметра контура с изрезанной границей стремится к бесконечности при уменьшении мерки длины. В настоящее время коэффициент дробной мерности (фрактальной размерности) пространства используется для оценки изрезанности географических границ [14], колебания мощности почвенного горизонта [16].

Основываясь на анализе географических данных, Jianguo Wu, Harbin Li [1] заключают, что четвертым пространственным измерением является масштаб. По их мнению, устройство географического пространства может быть описано в трех координатах: логарифм пространства, логарифм времени и паттерн. Паттерн может содержать в себе выделенные группы, таксоны или масштаб пространственных исследований. По их мнению, всякое природное явление имеет свой внутренний или характеристический масштаб (intrinsic or characteristic scales), который может не соответствовать используемому масштабу наблюдения, что приводит к неверным выводам и вызывает недоверие к исходным материалам. Иерархические уровни географического пространства рассматриваются в первую очередь, как отражение иерархической организации рельефа, почв и геологических структур, антропогенных объектов. Почвенный покров, являясь частью географического пространства, также характеризуется этими тремя параметрами.

В этой концепции время связано с пространственным масштабом так, что процессы одного масштабного уровня являются основой для развития процессов вышележащего уровня. Важнейшим выводом является то, что каждому масштабному слою пространства (уровню пространственной иерархии) соответствует характерное время [1], что может быть отражено в виде Stommel diagram.

Вейвлет-анализ основан на фурье-анализе одномерных числовых рядов, которые могут быть представлены с помощью фурье-преобразования как наложенные друг на друга гармонические колебания. Волна, охватывающая всю последовательность, содержит в себе волны меньших разме-

ров, формирующих иерархическую колебательную систему. С помощью окон, последовательно изменяющих размер, осуществляется их спектральный анализ. Пространственные природные иерархические системы аналогичны по структуре временным. Вейвлет-анализ позволяет выявить закономерности изменения размеров колебательных систем между уровнями иерархий, рассматривая их разномасштабные элементы структуры циклов.

Иерархическая концепция в почвоведении

В почвоведении проблема иерархических уровней организации пространства широко обсуждается, однако она ограничивается лишь одним свойством – структурой почвы. Почвенный покров входит на правах компонента в географическую оболочку, тем самым подпадает под действие закономерностей проблемы МАУР [2].

В классическом учебнике морфологии почв Б.Г. Розанов [7], анализируя уровни организации структуры почвы, предложенные А.Д. Ворониным и др., обосновывает 8 уровней иерархической организации почв. Они являются важным обобщением, но наибольшего внимания заслуживают сформулированные им два общих тезиса: 1) познание свойств только одного иерархического уровня не достаточно для целостного понимания объекта; 2) процессы, протекающие на разных иерархических уровнях, различны в сути, а исследования требуют на каждом уровне своего методического решения.

Часто в качестве модели иерархической системы используется образ русской матрешки. Однако в обычном виде вложенные друг в друга матрешки представляют собой слои вещества (типа конкреции) и не являются иерархической системой. Чтобы получить иерархическую систему, необходимо в объеме самой крупной матрешки распределить объемы матрешек среднего размера, а матрешка среднего размера должна быть сложена из матрешек мелкого размера, как почвенные комочки. Разберем эти матрешки на элементы и перемешаем их. В результате получим четырехмерную иерархическую матрешку, в которой присутствуют три независимых направления и одно выделенное направление в виде паттерна – размер элемента.

Направление от меньшего к большему называется «выделенным» потому, что переход из одного размерного уровня в другой качественно изменяет свойства объектов и методы его изучения.

Аналогичным образом можно разделить комочки хорошо оструктуренной почвы на части – от сложных структурных агрегатов до элементарной почвенной частицы. Элементарные почвенные частицы, соединяясь, образуют иерархические этажи первичной, вторичной, третичной почвенной структуры, формируя ярус от элементарной почвенной частицы до морфологического элемента,

составляющий почвенный горизонт. Следующий известный иерархический ярус – почвенный покров – выстраивается от элементарного почвенного ареала до почвенного покрова континента.

Отмечено [10], что все структурные уровни организации почвы находятся в причинно-следственной связи между собой. Исходя из этой положения, Е.А. Дмитриев [8] указывает на причинно-следственное нарушение пространственного сопряжения между иерархическим ярусом элементов структуры почвы и ярусом элементов структуры почвенного покрова. Фактически утерян целый ярус горизонтально организованных структур, о котором сведения отрывочны и не увязаны в теорию почвообразования. Без учета этой неоднородности почвенных слоев и тел осуществляется переход от морфологии почвенного тела (разрез) к неоднородности почвенного покрова (полипедон) в виде серии разрезов. Он утверждает, что отсутствует теория, объясняющая формирование почв между иерархическим уровнем почвообразовательных процессов в локальном месте и почвообразованием масштаба элементарного почвенного ареала.

Другими словами, присутствует пространственный интервал масштабов, который не может быть изучен существующими методами. В этот интервал попадают радиально организованные структуры, формирующиеся на коротких дистанциях – от десятков сантиметров до десятков метров, представляющие разнообразные процессы, обуславливающие гетерогенность почв [17]. Структуры могут быть объединены в элементарные единицы, не делимые в некотором масштабном интервале, при условии неизменности методов наблюдения – в почвенные индивидуумы.

Почвенный индивидуум

Вопрос размера почвенного индивидуума имеет практический смысл, так как позволяет сопоставить вариации локальной пространственной неоднородности почвы с протяженностью элементарного почвенного ареала. Масштаб исследования определяет размер неоднородности, который можно выявить при опробовании почвенного покрова, а следовательно, допустимую область его неопределенности, которая принимается как пространственно однородная. Одно наблюдение характеризует всю эту область. Эта однородность условна, и она обосновывается при выборе параметров эксперимента, одним из которых является пространственный масштаб. В англоязычной литературе [1] для её описания используется термин из фотографии «grain» – зерно. Эти наименьшие размеры можно было бы принять за почвенный индивидуум, но существуют ещё другие условия его выделения.

В американской почвенной классификации используется аналогичный по смыслу термин «педон», представляющий половину цикла изменения мощности горизонтов. Если циклы меньше

2 м или непрерывны, то за педон принимается призма сечением 1 м^2 [18]. Некоторое множество различающихся педонов одной таксономической единицы образуют полипедон. Почвенный индивидуум, или полипедон (*SI* – soil individual), рассматривается как мысленная пространственная проекция на почвенный покров архетипа таксона классификации (тип, подтип). Полипедон может являться как реально существующим физическим телом, представленным серией сопряженных педонов, так и объединяющим образом схожих по строению объектов.

Сущность почвенного индивидуума – это его двойственность. С одной стороны, индивидуум представляет собой пространственно-минимальную циклически повторяющуюся единицу внутри элементарного почвенного ареала, которая обладает сходством типодиагностических свойств, и в этом смысле однородна. С другой стороны, индивидуум – это пространственно-максимальный размер цикла, включающий в себя максимально возможное количество неоднородности свойств, присутствующей в почвенном покрове, что является причиной индивидуальности. Из этих рассуждений вытекают два подхода относительно определения размеров *SI*: от общего к частному и наоборот. В первом случае Е.А. Дмитриев [8] определяет его как наименьший объем, обладающий качествами типа почвы, во втором (Ф.И. Козловский [9]) – как максимальный пространственный цикл неоднородности свойств, включающий все возможные их вариации.

Вариант наименьшего объема предлагается реализовать использованием почвенной колонки сечением 1 дм^2 на глубину почвенного профиля. Такая колонка достаточна по размеру для диагностики почвы на уровне типа, но она может попасть в область, где гумусовый горизонт почти отсутствует, а рядом, на расстоянии 10 см, располагается колонка, где гумусовый горизонт уже имеет максимальные размеры (языковатая граница слоя). Таким образом, фиксируется множество индивидуумов, имеющих морфологические различия уровня вида, иногда подтипа почвы на протяжении стенки разреза.

Вариант максимального цикла основывается на том, что почвенный индивидуум должен максимально охватывать неоднородность почвенного покрова, свойственную данному классификационному таксону, которую можно оценить вероятностными методами на основе химических свойств почв, усреднением пространственно-распределенных случайных величин. По мнению Ф.И. Козловского [9], почвенный индивидуум – статистическое понятие, характеризующее пространственную вариабельность морфологически значимых свойств. Индивидуум не имеет точного местоположения в почвенном ареале и может быть определен только при сравнительном анализе неоднородно-

сти почвенного ареала. С этих позиций почвенный индивидуум всегда отличается от конкретного полипедона, используемого в качестве наименьшей неоднородности почв (цикла) в американской классификации почв [18]. Для определения пространственных циклов неоднородности почв предлагается использовать характеристическую функцию случайной величины. Характеристические функции могут быть получены с использованием автокорреляционной функции, которая оценивает пространственную согласованность свойств между группами точек наблюдения. Понимая иерархическую природу неоднородности почвенного покрова, он приходит к выводу о необходимости анализа циклических флуктуаций с использованием фурье-преобразования, которое рассматривается как сумма гармонических колебаний. Амплитуда характеризуется дисперсией, а частота отражает спектральную плотность пространственной флуктуации и связана с размерами периода. По его мнению, фурье-анализ позволяет выявить спектры частот, которые отражают характеристический масштаб, а сами периоды являются характеристическим размером почвенного индивидуума.

Развитие методики вычисления фурье-преобразований и упрощение алгоритма привело к появлению вейвлет-анализа [19, 20]. Произвольный спектр неоднородностей рассматривается в виде суммы составляющих циклов колебаний с разномасштабным периодом повторения. Как в классическом анализе, так и в современном виде используется окно изменяющегося размера, скользящее по изучаемой последовательности. Разложение кривой колебания характеристики производится по ортогональному базису, образованному сдвигами и кратномасштабными копиями вейвлет-функции [18]:

$$W(f(a, b)) = \langle f, \Psi_{ab} \rangle, \quad (1)$$

$$\Psi_{ab} = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{L-b}{a}\right), \quad (2)$$

где Ψ_{ab} – оконная вейвлет-функция, в которой a – масштабирующий параметр, b – параметр сдвига (лаг) пространства или времени, $1/\sqrt{a}$ – параметр нормировки вейвлет-функции, f – изучаемая функция типа $f=F(x)$, где x – расстояние на трансекте, W – множество разных функций (в дискретном случае матриц), соответствующих разной форме сигнала, а в нашем случае – циклов колебания свойств почв. Параметры a и b в формуле (2) задают размер окна. Изучаемая функция дискретна, но это не мешает реализации вейвлет-анализа.

Таким образом, вейвлет-анализ упрощает алгоритм определения размеров почвенного индивидуума, который ещё в конце прошлого века наметил Ф.И. Козловский [9] как анализ неоднородности почвенных свойств с использованием характеристической функции и фурье-преобразования.

Объекты и методы

Исследования проведены на просеке воздушной линии электропередачи сверхвысокого напряжения 500 кВ (ВЛ СВН), направленной с востока на запад. Возраст ВЛ СВН на момент проведения исследования – 13 лет. Земля под ВЛ СВН находится в санитарной зоне отчуждения шириной 60 м, проложенной в виде просеки, которая используется фермерами для проезда, выпаса домашней скотины и сенокошения. В одном створе проложены две ВЛ СВН: одна – в 1967 г., другая – в 1986 г. Место исследования географически располагается на восточном склоне Арчекаского кряжа. Район исследований относят к Мариинско-Ачинскому почвенному округу расчлененной лесостепи предгорий. Административная принадлежность – Ижморский район Кемеровской области.

На просеке по макросклону кряжа сверху вниз сменяются типичные черноземы, серые лесные, дерново-подзолистые почвы, в нижней части – слабообразованные дерновые почвы на супесчаном делювии. Изученные дерново-подзолистые почвы азональны и в виде полосы располагаются на пологой средней части склона Арчекаского кряжа. Просека ВЛ СВН от р. Алчедат поднимается по макросклону до водораздела. Она ориентирована с востока на запад. На просеке дерново-подзолистые почвы имеют морфологическую особенность в виде второго гумусового горизонта. Выглядит он, как серые пятна в нижней части элювиального горизонта. Морфологическое строение, химические и физические свойства этих почв достаточно подробно изучены [21].

Объектом исследования является слой гумусового горизонта (АУ) дерново-подзолистых почв. Просека ВЛ СВН используется для сенокошения и выпаса деревенского скота, поэтому подстилка отсутствует. Верхний слой, где располагаются корни растений, уплотнен, поэтому поверхность почвы при

измерениях мощности слоя отбивается с высокой точностью. Проблемы измерения возникают в местах расположения дерновин злаков, где измерения ведутся на срезе от плотной поверхности почвы.

Мощность гумусового слоя традиционно используется для изучения неоднородности почвенного покрова [16]. Выбор этого признака обусловлен тремя причинами: 1) граница между горизонтами АУ и Е1 контрастна, чувствительна к внешним воздействиям и определяется с достаточной точностью – менее 0,1–0,5 см; 2) флуктуации мощности отражают изменение запасов гумуса; 3) в классификации почв (2004) мощность горизонта отражает видовую принадлежность [22].

Варьирование случайной величины мощности слоя определяется природой самого объекта. Из-за языковатой нижней границы слоя показатель мощности АУ имеет высокую вариабельность. Верхняя граница изменяется незначительно относительно нижней. В результате на одной стенке разреза почва шириной 40 см может изменяться от маломощной до мощной

Трансекта, на которой измерялась мощность АУ, пересекает просеку перпендикулярно ВЛ СВН (рис. 1). Северная часть трансекты начинается в осиновом подросте 10-летнего возраста, а заканчивается в сосново-березовом лесу.

Трансекта пересекает просеку ВЛ СВН в области максимального провиса проводов (середина между опорами). Она пикетирована через 1 м. Нивелиром проведена гипсометрическая съемка рельефа поверхности. Профиль трансекты слабо выпуклый к центру просеки, максимальная отметка рельефа поверхности находится под центральным проводом ВЛ СВН, к краям рельеф постепенно понижается. Перепад в 0,5 м на 30 м (половина длины трансекты) практически незаметен глазу.

При строительстве и эксплуатации ВЛ СВН (500 кВ) почвы просеки подвергались воздействию

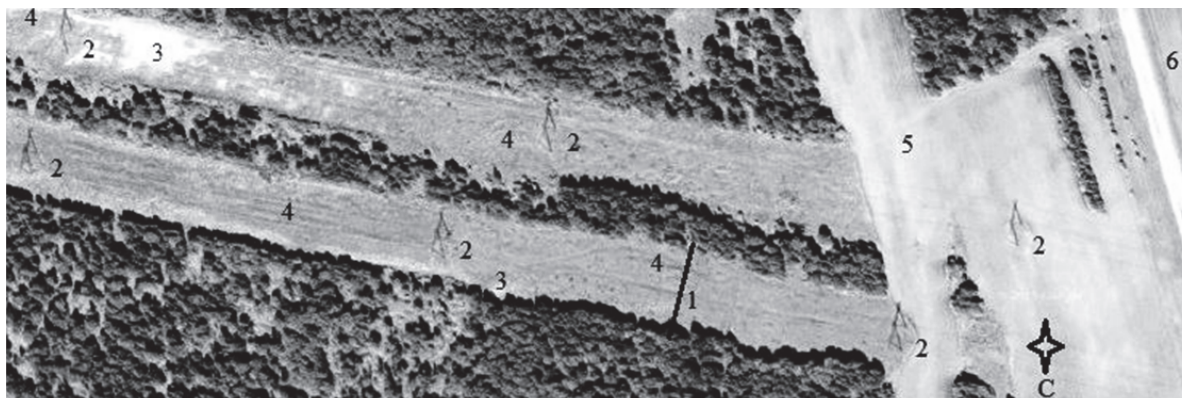


Рис. 1. Локализация трансекты на местности (снимок 2015 г. опубликован Google®). Условные обозначения: 1 – черной линией показано положение трансекты, 2 – опора ВЛ СВН 500 кВ, 3 – сильно нарушенные земли, 4 – следы, оставленные ходовыми системами тяжелой техники, 5 – пашня, 6 – дорога из Ижморки в Троицкое

Fig. 1. Localization of transects (space image was published in 2015 by Google®). Legend picture: 1 – the black line shows the position of the transect, 2 is the 500 kV transmission tower, 3 are the highly disturbed lands, 4 – tracks of undercarriage of heavy vehicles, 5 is the arable land, 6 is the road from Izhmorka to Troitskoe

агрегатов и ходовых систем тяжелой техники с формированием разной степени антропогенно-измененных почв [23]. На поверхности почв просеки наблюдаются колеи, пятна с отсутствием гумусового горизонта или его малой мощностью (абраземы) и насыпные слои грунта (стратоземы). Следы строительства сохраняются более 30 лет. Наибольшее их количество располагается вблизи опор ВЛ СВН, а также по центру и по краям просеки. Трансекта заложена в средней части между опорами, где антропогенно-нарушенных почв наименьшее количество. Дополнительную естественную неоднородность почв просеки вносит унаследованная парцеллярная структура леса.

Вдоль трансекты заложена траншея. На стенке траншеи проведены измерения мощности аккумулятивно-гумусового горизонта. Глубина траншеи составляет 0,6 м, а длина – 67 м. Ф.И. Козловским [9] показано, что всю неоднородность почвенного покрова можно оценить по одной траншее, если она достаточной длины. Предположим, A – минимальный размер цикла, B – максимальный размер цикла, тогда длина траншеи должна быть $6B$, а шаг измерения – $0,2A$. В нашем случае предлагается: $A=0,2$ м, $B=10$ м, следовательно, максимальный размер траншеи должен быть равен 60 м, а шаг измерения – 4 см.

Мощность горизонта измеряется в зависимости от её колебания в точках перегиба границы слоя. Расстояние между точками измерений является переменной величиной. Среднее расстояние между измерениями составляет 3,7 см. Замеры мощности

слоя АУ произведены с использованием металлической линейки. В результате сформирована дискретная функции зависимости мощности слоя (см) и расстояния (м) от начала траншеи, отображенная на рис. 2. В среднем шаг измерения получился дробным (3,75 см), что соответствует расчетным значениям (4 см).

Исследование функции колебания мощности слоя от расстояния проведено с использованием вейвлетов. Вейвлет-анализ и иерархический кластерный анализ дают схожие результаты по структуре итоговой диаграммы. Выбор вейвлет-анализа для обработки данных обусловлен тем, что в нем присутствует важный показатель – размеры циклов при разных уровнях детализации, отсутствующий в кластерном анализе. Циклы, различающиеся по знаку фазы, вложены друг в друга, что отражает устройство иерархических систем. Уровень детализации показывает относительное изменение пространственного масштаба отображения неоднородности мощности слоя. Эти важные качества вейвлет-анализа определяют его выбор, так как одной из задач работы является выявление соответствия между масштабом исследования и размером неоднородностей.

В анализе вейвлетов подбирается удобная форма функции (1), подходящая по форме изучаемому сигналу, которая одинаково успешно может использоваться как для анализа временных последовательностей, так и пространственных неоднородностей. В нашем случае использована гауссовская функция, имеющая вид колокола, отражающая по форме (морфологии) колебание мощности слоя.

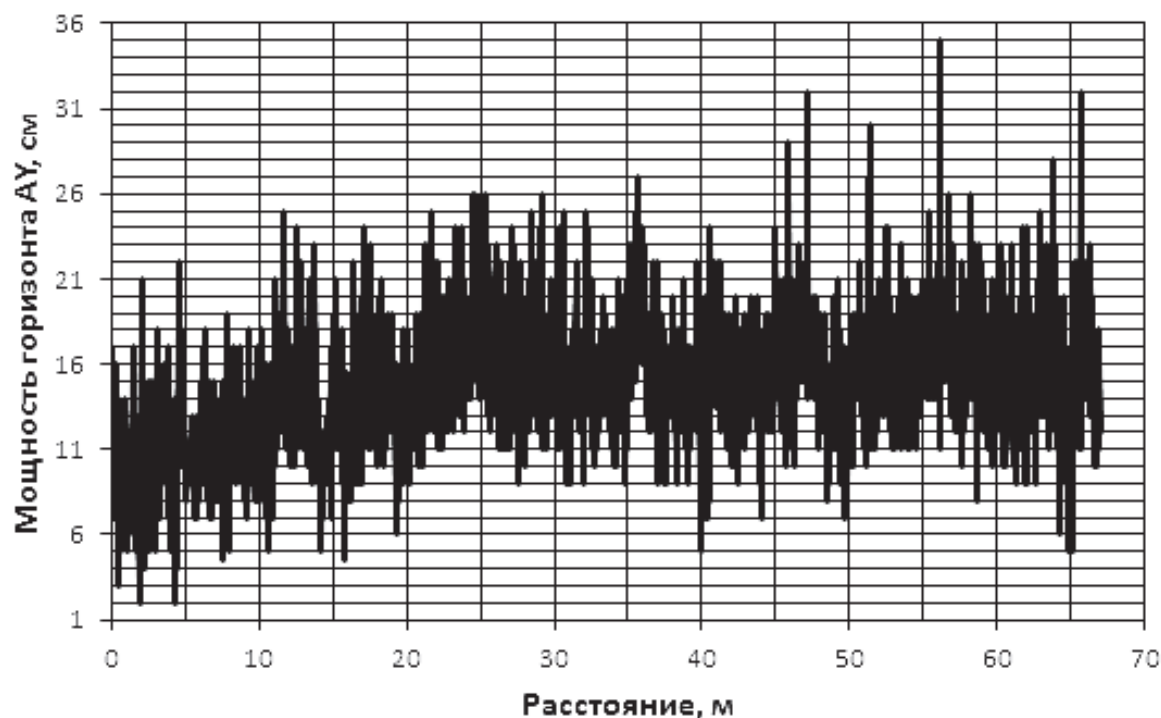


Рис. 2. Мощность АУ (см) трансекты

Fig. 2. Depth АУ (cm) of the transect

Обработка данных осуществляется с помощью вейвлет-анализа, реализованного в пакете МАТ-ЛАБ-7.1 на основе функции гаусс-5 (sgau5) [19]. В программе задается детализация, определяющая масштабный диапазон, в данном случае – 1000 единиц.

Оконная вейвлет-функция (2) скользит по изучаемой последовательности, при этом рассчитывается угол смещения от $+\pi$ до $-\pi$ между волной вейвлет-функции и волной изучаемой дискретной последовательности. При первой итерации в окно попадает вся последовательность целиком и сравнивается с генерируемой гауссовой модельной фигурой. Затем окно уменьшается в 2 раза (по умолчанию) и расчет запускается снова. Процесс заканчивается при шаге, равном минимальному интервалу исходной последовательности измерений (1 см). Минимальный масштаб пространства – это размер наименьшего языка слоя, максимальный – всей длины траншеи.

Масштабирующий параметр (a) в оконной функции задает изменение размерности окна. Каждое кратное увеличение оконной функции приводит к изменению относительного масштаба на единицу, что отражает уровень детализации. Чем больше выбран масштабный параметр, тем детальней будет прорисована фазово-частотная диаграмма и тем больше размер выходной матрицы.

Объем исходной матрицы составляет 1826 измерений. Общий размер равен объему исходной матрицы, умноженной на масштабный параметр

1000. Конечная выходная матрица содержит 1 826 000 значений угла смещения фазы колебаний характеристики ($\pm\pi$) через интервал, равный 0,01 м.

Дальнейшая обработка полученной матрицы фазово-частотной характеристики (ФЧХ) осуществляется с помощью Surfer 12. В результате получена эквипотенциальная трехмерная поверхность значения фазово-частотной характеристики в зависимости от уровня детализации и длины трансекты. Уровни детализации для дальнейшего анализа выбираются, исходя из формы полученной ФЧХ, примерно посередине между положениями ветвления (бифуркациями).

Результаты и обсуждение

Построена диаграмма фазово-частотной характеристики флуктуаций мощности слоя гумусового горизонта АУ (рис. 3) [4]. На диаграмме ФЧХ выделено 7 масштабных уровней, отмеченных между бифуркациями (точками разделения), приводящих к существенному увеличению деталей фазово-частотной диаграммы: 20, 40, 80, 150, 300, 440, 750. Линии выбраны таким образом, чтобы захватить максимальное количество циклов.

Линии, параллельные оси абсцисс, отражают изменение ФЧХ при разных масштабных параметрах (уровень детализации). Они проведены таким образом, чтобы захватить максимальное количество отрицательных и положительных фаз. По этим параметрам вейвлет-функции определяются сред-

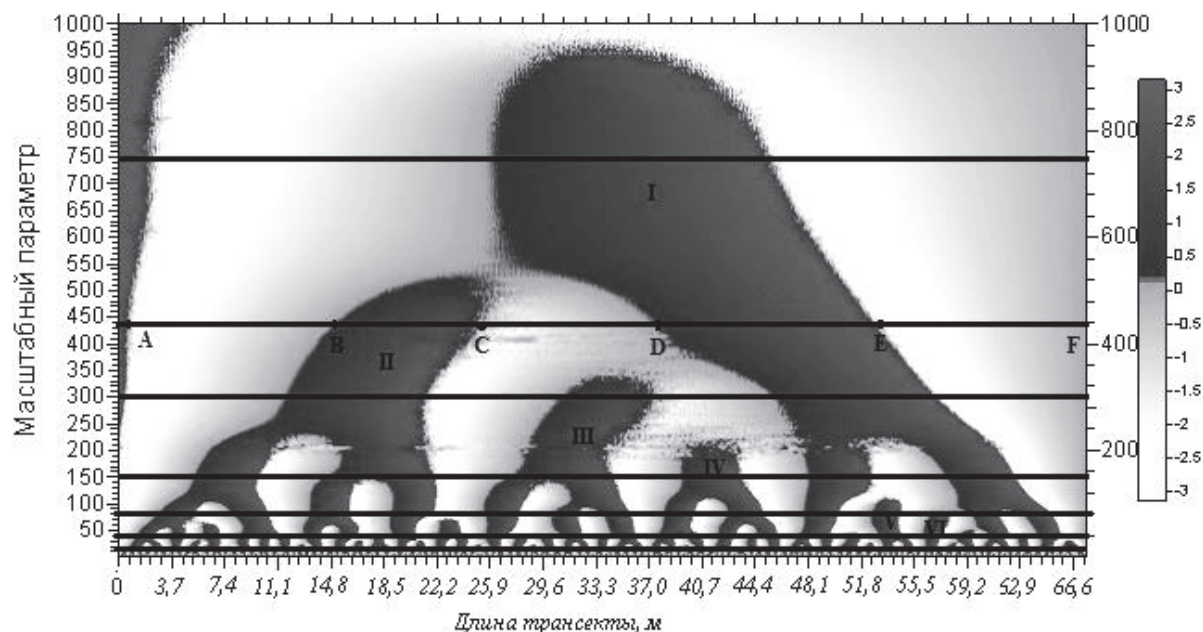


Рис. 3. Вейвлет-диаграмма фазово-частотной характеристики (от $-\pi$ до $+\pi$ рад) флуктуации мощности АУ (см): горизонтальными линиями показаны уровни детализации (1–1000); латинскими буквами А, В, С, D, F – точки измерения перехода фазы от плюса к минусу

Fig. 3. Wavelet diagram of phase-frequency description (from $-\pi$ to $+\pi$ rad.) of AY power fluctuations (cm): the horizontal lines show the levels of detail (1–1000), the Latin letters A, B, C, D, F show the measuring points of phase transition from plus to minus

ние значения ширины (м) отдельно для положительных и отрицательных фаз по данным расчетной матрицы ФЧХ. Размеры циклов измеряются отдельно для фаз < 0 и фаз > 0 . Например, уровню относительного масштабирования (детализации) 450 соответствуют точки O, A, B, C, D, E, F. Точки размечаются на результирующей матрице фазово-частотной характеристики. Отмечается в метрах длина цикла с одной фазой. Подсчитывается количество циклов отдельно для положительных и отрицательных фаз. Крайней правой границей цикла отрицательной фазы считается 67 м, крайне левой – 0. В расчет принимаются только целые циклы, так чтобы исключить краевой эффект, например от 0 до точки A, ведь истинные размеры цикла пока не определены.

На диаграмме ФЧХ положительные сдвиги по фазе (совпадающие с формой вейвлета) отображены черным цветом, и они соответствуют циклу относительного увеличения мощности слоя. Светло-серым цветом с градиентным оттенком изображены отрицательные сдвиги по фазе – снижение мощности АУ. Например, вейвлет оконной функции в виде гауссиана направлен в сторону увеличения значений, а мощность горизонта внутри окна снижается, тогда фазово-частотная характеристика будет отрицательная, а её значение соответствовать углу фазового смещения в радианах.

Фигура ФЧХ черного цвета отображена в виде «шляпы» от южной части просеки (слева) до северной (справа), что указывает на присутствие единого цикла увеличения мощности слоя на просеке. Она иерархически вложена в более крупную по размерам структуру с отрицательной фазой (маломощные дерново-подзолистые почвы).

Следует отметить элементы симметрии ФЧХ мощности слоя по всей длине трансекты. Элемент ФЧХ отрицательной фазы, охватывающий размеры от 19 по 47 м, состоит из двух элементов положительной фазы, в свою очередь состоящих из двух элементов отрицательной фазы. Диаграмма ФЧХ санитарно-защитной зоны достаточно симметрична относительно центрального провода ВЛ СВН.

Асимметрия вызвана преобладанием на диаграмме размеров положительной фазы в правой части зоны относительно левой. Размеры элементов внутри неё закономерно уменьшаются от центра к краям фигуры. Такое положение присутствует на более низких уровнях детализации. В левой части трансекты (от 0 до 26 м) наблюдается на единицу меньше иерархически вложенных уровней детализации по сравнению с правой частью – от 26 до 67 м.

Проекция центрального провода ВЛ СВН выпадает на центр фигуры – 33 м. Левая часть «шляпы» оказалась «разорванной» в районе крайнего провода ВЛ СВН (24–26 м). Этот разрыв вызван уплотнением почв на грунтовой дороге, которая используется местными фермерами для проезда.

Грунтовая дорога существует со времени строительства ВЛ СВН. Почва на ней уплотнена слева между центральным и крайним проводами, поэтому распад темно-серого колокола фазово-частотной функции обусловлен присутствием здесь антропогенно-нарушенных почв с преобладанием на диаграмме областей с отрицательным смещением фазы колебания (светло-серые градиентные тона). Левая часть просеки сложена относительно однородными по мощности гумусового горизонта почвами, на правой наблюдаются ярко выраженные циклы.

На уровне масштабных параметров 200–250 и 400–440 наблюдаются искажения формы деталей изображения фазово-частотных характеристик в виде горизонтальных полос, создающих неровный слоистый рисунок с внедрением отрицательных фаз в область положительных её значений и положительных фаз в область отрицательных значений. Полосы размывают границы изображения положительных фаз. Предполагается, что их появление обусловлено присутствием антропогенно-измененных почв, образовавшихся во время строительства ВЛ СВН, и сейчас эти природные участки находятся в стадии восстановления, но естественные циклы колебания мощности слоя искажаются. Ниже масштабного параметра 150 все детали прорисованы четко, так что на этом иерархическом уровне антропогенное воздействие не выявляется. Размеры пятен меньше размеров навесных агрегатов бульдозеров, используемых при строительстве ВЛ СВН, но они создают свои циклы, которые проявляются на этих уровнях детализации. Флуктуации мощности АУ внутри пятен нарушенных почв происходят по тем же естественным законам, что и на ненарушенных участках, только мощность непропорционально снижена.

Фазово-частотная характеристика мощности слоя имеет внутренние закономерности, которые могут быть использованы для вычисления характеристических размеров неоднородностей почвенного покрова. Проблема поиска такого размера природных объектов, содержащего в себе во всей полноте изучаемые свойства, является общей для многих наук, занимающихся пространственно-временными исследованиями, особенно если за объекты исследования принимаются сложно устроенные природные тела [9, 2]. Концепция основывается на гипотезе, что структурная организация системы может быть определена как совокупность элементарных ячеек, обладающих всей полнотой неоднородности, которые могут быть тиражированы симметричным отображением на весь объект. Например, элементарную естественную ячейку делимости горной породы геологи называли фрустумом (от лат. *frustum* – кусок) и фрустулы имеют разный характеристический объем [24]. Соответствующие объемы изучаемых проб (масштаб) увеличиваются по геометрическому закону. Важной особенностью является то, что вероятное коли-

чество зерен фрустума изменяется в узких пределах. Педон аналогичен по смыслу фрустуму. Он представляет собой циклическое изменение в пространстве каких-либо типодиагностических свойств почв.

Усредненный период циклических неоднородностей можно принять за вероятный размер индивидуума в пространстве и транслировать его свойства в полипедон. Почвенным индивидуумом можно считать всю «шляпу» фазово-частотной диаграммы положительной фазы на рис. 3, состоящую из циклов, вложенных один в другой. Циклы правой части просеки ВЛ СВН оказываются вложенными в циклы центра просеки на единицу большим числом этажей иерархии. Трансекта случайным образом оказалась в переходной полосе между дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами, что формирует два цикла увеличения мощности слоя гумусового горизонта. Первый обусловлен преобладанием дерново-подзолистых почв с пониженной мощностью слоя, но с присутствием пятен второго гумусового горизонта в нижней части подзолистого. Второй цикл вызван возрастанием мощности слоя в связи с появлением в правой части трансекты почв, по морфологии близких к типу серых лесных, но с присутствием пятен подзолистого горизонта.

На основе фазово-частотной матрицы рассчитаны средние линейные длины циклов с одной фазой. При масштабном параметре 1000 условно выделено 2 цикла, хотя явно присутствует только один с положительной фазой, и его максимальный размер совпадает с длиной просеки (67 м). Масштабный параметр 750 имеет 3 цикла, но этого недостаточно для статистических расчетов дисперсии. Параметр 440 характеризуется повышенной дисперсией, что отражается в высоком значении доверительного интервала, но имеет 5 циклов, что достаточно для статистических расчетов.

Наблюдается линейная зависимость между длиной цикла и масштабным параметром $R^2=0,999$ при $p<0,05$:

$$Lc = 0,44 + 0,03Mp, \quad (3)$$

где Lc – средняя длина циклов (м); Mp – масштабный параметр.

Количество циклов в зависимости от масштабного параметра рассчитывается по формуле

$$N = 691Mp^{-0,78}. \quad (4)$$

С использованием формулы (3) рассчитаны значения Lc для масштабных параметров (1000, 10, 1), которые затруднительно определить, используя матрицу ФЧХ. При масштабном параметре 1000 отсутствуют целые циклы, а при масштабных параметрах 10 и 1 они очень короткие и их множество, что затрудняет измерения. Размеры циклов зависят от масштабного параметра, следовательно, и размеры SI тоже должны определяться масштабом наблюдений (уровнем иерархии) (табл. 1).

Таблица 1. Размеры (м) и количество циклов АУ (см), средняя длина цикла Lc (м), количество циклов N при разном параметре масштаба на основе вейвлет-анализа

Table 1. Dimensions (m) and the number of cycles AY (cm), the average length of the cycle (m), the number of cycles at different scale parameter based on wavelet analysis

Детализация, Mp Detailing, Mp	Размеры циклов (м) с фазой Sizes of cycles (m) with phase		Средняя длина цикла, м Average cycle length, m	Количество циклов Number of full cycles	Размеры почвенного индивидуума, м Length of soil individual SI, m
	>0	<0			
1000	–	–	30,7*	1	–
750	23,0	22,1	22,7±1,1	3	41,0
440	13,8	12,4	13,2±2,2	5	18,2±0,9
300	10,1	8,7	9,4±1,4	8	6,6±0,1,1
150	4,6	5,8	5,2±0,6	13	2,92±0,44
80	2,7	2,7	2,7±0,4	25	0,82±0,1
40	2,0	1,4	1,7±0,2	39	0,28±0,04
20	1,3	0,8	1,0±0,09	65	0,11±0,01
10	–	–	0,7*	115**	–
1	–	–	0,5*	691**	–

Примечание: * – рассчитанные значения средней длины цикла по формуле 3, ** – по формуле 4.

Note: * – estimated values of the average cycle length by the formula 3, ** – by the formula 4.

Уровни детализации – это иерархически уложенные циклы колебаний мощности слоя. Циклы отрицательной и положительной фаз имеют близкие значения по длине, хотя их размеры положительной фазы больше или равны отрицательной, за исключением уровня детализации 150, где значение отрицательной фазы больше положительной. В силу того что исходные параметры ФЧХ относительны, размеры SI могут быть определены с уверенностью только при сравнении размеров циклов вышележащего уровня детализации с нижележащим. В этом случае происходит проецирование объектов с менее крупного на более крупный масштабный план, соответственно, переход с одного иерархического уровня на другой.

Индивидуум должен содержать в себе как положительную, так и отрицательную фазы (от $-\pi$ до $+\pi$), поэтому среднюю величину цикла надо увеличить вдвое ($2Lc$). Тогда длина SI должна быть равна удвоенной средней длине цикла вышележащего слоя, деленной на сокращенное в 2 раза количество циклов нижерасположенного уровня иерархии:

$$SI = \frac{4Lc_{i+1}}{N_i},$$

где SI – линейный размер почвенного индивидуума; Lc_{i+1} – длина среднего цикла предыдущего масштабного уровня ($i+1$); N_i – количество циклов текущего уровня; $i=1,2,...,n$ – порядковый номер масштабного параметра. Ранее мной в статье [25]

был проведен расчет с использованием средней величины цикла одного знака фазы, поэтому размеры индивидуума оказались существенно меньше. Полный размер индивидуума есть удвоенная величина циклов положительной и отрицательной фаз.

Следуя определению почвенного индивидуума, данному Ф.И. Козловским [9], предполагаем, что максимальный период цикла колебания мощности горизонта АУ является отражением размера индивидуума. Однако нет никакой уверенности, что траншея в 67 м вскрыла полный максимальный цикл. Требуется иное правило определения максимального размера SI .

Такой способ может быть реализован с использованием закономерности изменения размеров циклов (L_c) в зависимости от их количества (N) при уровнях детализации от 20 до 750. Затем вычисляем размер максимального цикла, положив $N=1$.

Основываясь на данных табл. 1, определена закономерность увеличения размеров циклов при уменьшении их количества:

$$SI = \frac{447}{N^2}. \quad (4)$$

Исходя из формулы (4), если принять $N=1$, то получим искомый максимальный размер почвенного индивидуума, равный 447 м. Точность такого расчета не высока, так как определяется по 7 значениям уровней детализации (20–750), поэтому округлим до 450 м.

Для определения характеристического масштаба сопоставим размеры в натуре с расчетными значениями. Размер SI (450 м) при масштабе 1:2000 будет иметь размер отображения 250 мм, что уложится на стандартный лист бумаги. Используя эти пропорции и округляя до целых значений, получен весь набор масштабов неоднородности почвенного покрова индивидуумов низшего иерархического ранга (табл. 2).

Следуя представлениям Ф.И. Козловского [9], за размер почвенного индивидуума принимается размер, на котором реализуются все возможные присутствующие циклы изменения типа диагностических свойств таксономического уровня, а за линейный размер индивидуума принимается максимальный цикл (450 м). Масштаб 1:2000 позволяет изучить наиболее крупные неоднородности внутри элементарного почвенного ареала, что доказывает его целостность и определяет границы, отделяющие от других ареалов или непочвенных объектов.

Внутри типового индивидуума различаются множества групп, тяготеющих к той или иной таксономической категории (по Е.А. Дмитриеву [8] – педопопуляции), построенных на принципах иерархической системы. В этом случае получается структура иерархически соподчиненных индивидуумов, имеющих свой характеристический масштаб и свой линейный размер.

Таблица 2. Количество индивидуумов (N) в иерархии на единице площади, их расчетные размеры (SI) и масштаб исследования

Table 2. The number of individuals (N) in the hierarchy to a unit area, their estimated size (SI) and research scale

N	$\sim SI, \text{ м}$	Масштаб исследования 1: SI Scale research 1: SI
1,0	450	2 000
1,6	200	800
2,9	50	250
5,0	18	80
8,0	7	35
13,0	3	15
25,0	0,7	3
39,0	0,3	2
65,0	0,1	0,5 (2:1)

По мнению В.П. Самсоновой [16], которая основывается на частотах распределения мощности гумусового горизонта, границы раздела внутри вида не достаточно точно обозначены. Кроме того, может быть, между подтипом и видом следует выделять дополнительные таксономические разделы, для которых характеристические линейные размеры индивидуума будут равны 200 м, 50 м или даже меньше. Кроме того, возможно включение в таксон «род» почвенных объектов радиальной направленности и объектов с её отсутствием. Следует исходить из того, что типизация объектов радиальной направленности имеет соподчиненное положение относительно профильной типизации.

Важным обобщением полученных закономерностей является зависимость, связывающая линейные размеры почвенного индивидуума и его частоту встречаемости. Если $f=1/N$ принять за частоту встречаемости индивидуумов, то из соотношения (4) вытекает важное свойство:

$$f = kSI^{1/2},$$

где k – константа, отражающая максимальный размер почвенного индивидуума. Частота встречаемости почвенных индивидуумов (f) пропорциональна квадратному корню его длины (SI).

Наименьший линейный размер неоднородности почвенного покрова в табл. 2 составляет 10 см при масштабе выявления 2:1. Установлено, что языки АУ в той или иной степени приурочены к вертикальным трещинам и границы соседних слоев коррелированы [26]. Ширина языка изменяется от 3 до 12 см. По-видимому, минимальный размер почвенной неоднородности 0,1 м обусловлен шириной языка границы слоя гумусового горизонта, циклично повторяющегося в пространстве. В морфологии Б.Г. Розанова [7] достаточно подробно характеризуется форма языков почвенных горизонтов, что может быть использовано для таксономического разделения. Возможно, выделение дополнительных таксонов почвенной классификации внутри подтипа позволило бы обрести утерянный,

по Е.А. Дмитриеву [8], иерархический интервал почвенной неоднородности между морфологическими структурами почвенного описания и структурами элементарного почвенного ареала.

Кроме траншеи для измерения мощностей гумусового горизонта заложена другая траншея – длиной 30 м от крайнего провода ВЛ СВН до сосны, расположенной на краю леса, на которой изучалась естественная неоднородность, являющаяся причиной колебания мощности изученного слоя. На этой траншее заложен горизонтальный срез шириной 0,5 м, вскрывающий вертикальную трещинную сеть элювиального горизонта дерново-подзолистой почвы.

Предварительные результаты опубликованы в [27]. Горизонтальный срез выявил неоднородность почв в виде трещинной сети при интервале изменении средней площади ячеек на квадратном метре от 291 до 594 см². Предположив, что форма ячеек близка к квадрату, получаем линейные размеры минимальных циклов – от 17 до 24 см. Они близки к циклам, рассчитанным на основе ФЧХ вейвлет-анализа, размером 0,3 м при масштабе исследования 1:2. Это минимальная дискретность, но педонном её назвать нельзя, так как она меньше установленных в классификации размеров [18].

Проведенное сравнение площади ячеек трещинной сети в подкроновом пространстве крупной сосны в лесу и в отдельных местах на просеке под ВЛ СВН показывает, что в том и другом случае наблюдается существенное увеличение площади ячеек. При дополнительном обследовании мест с большой мощностью ячеек обнаружены отщепы коры сосны и древесины. Следовательно, места произрастания сосен остаются в почвенном покрове под ВЛ СВН и выявляются через 13 лет после её строительства в виде участков с наименьшей площадью ячеек трещинной сети. Воздействие древесной растительности на свойства почв формирует в пределах проекции кроны пространственно-локализованную неоднородность по морфологическим, физическим и другим свойствам [28–30]. В пределах проекции кроны дерева располагается корневая система, которая перегибается в условиях просеки ВЛ СВН, но места расположения корней могут влиять на мощность гумусового горизонта. Линейные размеры этих участков меньше проекции кроны и составляют 4–6 м. Они соответствуют выявленным с помощью вейвлет-анализа циклам порядка 7 м (табл. 2) с характеристическим масштабом 1:35.

Размеры антропогенных нарушений соответствуют размерам ходовых систем техники и навесным агрегатам бульдозеров, которые расчищают просеку во время её строительства и срезания кустов и поросли при эксплуатации ВЛ СВН.

Знание размеров неоднородности почвенного покрова можно использовать для предварительного планирования объема научно-исследовательской работы. Допустим, предполагается изучить

неоднородность почвенного покрова, образованную в результате воздействия корчевателей при строительстве ВЛ СВН, предварительно определив средние размеры пятен антропогенно-измененных почв (абраземы), возникших при раскорчевке. Они составляют 1,4–3,0 м в диаметре. Такие размеры неоднородности почв соответствуют уровню детализации 150 (см. табл. 1) с размером почвенного индивидуума 2,92 м. Основываясь на данных табл. 2, масштаб при планировании сети наблюдений, гарантировано захватывающий объект таких размеров, должен быть равным 1:15 (~М 1:20). Если неоднородность почвенного покрова возникла по причине действия бульдозера с шириной отвала 3,2 м, то масштаб сетки измерений следует взять 1:35 (~1:40).

Существует обратная задача – планирование точек отбора проб при подфакельных экологических исследованиях. Зная количество неоднородностей на единицу площади (N), из табл. 2 определяются интервалы наблюдений, соответствующие размерам SI , а для определения охвата исследуемой территории используется соответствующий масштаб, отражающий данный уровень неоднородности почвенного покрова. Рекомендуется для типа дерново-подзолистой почвы в условиях санитарно-защитной зоны линейные устанавливать максимальные размеры интервалов сети наблюдений не более 450–500 м.

Заключение

Проблема изменяющегося масштаба обоснована в 1979 г., и в последнее время тема получила бурное развитие. Географы в начале 21 века определили положение всякого природного феномена в географическом пространстве тремя параметрами: пространство (space), время (time), pattern. Это касается в полной мере почвенного покрова, как элемента географической оболочки.

Известно, что неоднородность почвенного покрова имеет сложную иерархическую структуру – от локального почвенного описания до почвенного покрова континента. Такое представление проблемы приводит к выводу, что в понятии «почвенный индивидуум» присутствует сложная иерархическая структура, которая может быть изучена с использованием вейвлет-анализа.

Показано, что с помощью вейвлет-анализа выявляются иерархически соподчиненные циклы неоднородности почвенного покрова на малых дистанциях. Установлено наличие 8 уровней иерархии неоднородности почвенного покрова, каждый из которых может иметь свой характеристический масштаб и, соответственно, почвенный индивидуум.

Установлено, что положительная фаза ФЧХ колебания мощности АУ просеки ВЛ СВН представляет по форме «шляпу» (не только в силу специфики выбранной гауссовской оконной вейвлет-функции), внутренние структуры которой обладают общей симметрией. Центр положительных зна-

чений угла смещения фазы располагается в середине просеки. Он является организующим началом для всех вложенных циклов, как на левой, так и на правой сторонах трансекты. Этот факт указывает на целостность почвенного покрова, как природного образования, на просеке в пределах санитарно-защитной зоны ВЛ СВН.

В деталях диаграммы ФЧХ наблюдается асимметрия, например, количество уровней детализации в северной части просеке меньше на единицу относительно южной части. Фигура отрицательной фазы от 19 по 47 м, состоящая из 3-х крупных частей, размеры циклов которой закономерно уменьшаются от центра к краям просеки, что отражает общую закономерность перехода типа дерново-подзолистых почв к серым лесным почвам.

Почвенные циклы неоднородности меньшего размера обусловлены парцеллярной структурой леса, которая унаследована почвами просеки, что обнаруживается с помощью вейвлет-анализа. Эти уровни иерархии неоднородности почвенного покрова на малых дистанциях должны иметь таксономическое определение в классификации почв. Для этих целей, возможно, следует вывести таксоны, учитывающие радиальные структуры строения почв.

Размеры антропогенных нарушений соответствуют размерам ходовых систем техники и навесным агрегатам бульдозеров, которые расчищают просеку во время её строительства и срезания кустов и поросли при эксплуатации ВЛСВН.

Выявлено, что наименьший размер неоднородности почвенного покрова составляет 10 см при масштабе выявления 2:1, что соответствует расстоянию между языками границы почвенного слоя

гумусового горизонта дерново-подзолистой почвы. Большая часть языков слоя обусловлена вертикальной трещинной сетью элювиального и переходного горизонтов почв, которая обуславливает циклическое колебание нижней границы слоя.

Показана возможность расчета максимального значения цикла неоднородности почвенного покрова, которую можно принять в качестве почвенного индивидуума (по Ф.И. Козловскому). На основе изученной протяженности разномасштабных циклов выявлено, что размер почвенного индивидуума обратно пропорционален квадрату количества циклов с множителем, равным 447. Размер почвенного индивидуума, соответствующий типовому таксону дерново-подзолистых почв, можно принять равным ~ 450 м, который рассматривается как максимальный размер, включающий все множество циклов колебаний мощности гумусового горизонта.

Размеры масштабной сетки наблюдений следует планировать, основываясь на предварительных натурных измерениях длины неоднородностей почвенного покрова. Полученные значения циклов неоднородности почв сравниваются с табличными значениями средних размеров циклов, которые используются при планировании частоты сети наблюдений на малых дистанциях для учета деградации почв не только на землях санитарно-защитных зон линий электропередачи, но на землях других линейных сооружений.

Для типа дерново-подзолистых почв при формировании сети мониторинговых наблюдений рекомендуется устанавливать расстояние между почвенными наблюдениями менее или равным размерам почвенного индивидуума – 450–500 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu J., Li H. Concepts of scale and scaling // *Scaling and Uncertainty Analysis in ecology*. – Netherlands: Springer, 2006. – P. 3–16. DOI: 10.1007/1-4020-4663-4_1.
2. Geopedology. An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies / J.A. Zinck, G. Metternicht, G. Bocco, H.F. del Valle. – Switzerland: Springer International publishing, 2016. 549 p. DOI: 10.1007/978-3-319-19159-1_1.
3. A wavelet analysis of the relationship between Loess Plateau erosion and sunspots / P. Gao, V. Geissen, A. Temme, C.J. Ritsema, X. Mu, F. Wang // *Geoderma*. – 2014. – V. 213. – P. 453–459. DOI:10.1016/j.geoderma.2013.08.028.
4. Lin Z.S., Bian W.L., You W.H. The wavelets and hierarchies of the climate system // *Meteorology and Atmospheric Physics*. – March 1996. – V. 61. – P. 19–26.
5. Алексеев В.И., Полищук Ю.М. Прогноз изменений температуры по палеоклиматическим данным и инструментальным измерениям на основе методов вейвлет-анализа и нечетких нейронных сетей // *Вестник Югорского государственного университета*. – 2013. – Вып. 3 (30). – С. 11–14.
6. Марков М.А. О природе материи. – М.: Изд-во Наука. 1976. – 216 с.
7. Розанов Б.Г. Морфология почв. – М.: Академический проект, 2004. – 431 с.
8. Дмитриев Е.А. Теоретические и методологические проблемы почвоведения. – М.: ГЕОС, 2001. – 374 с.
9. Козловский Ф.И. Теория и методы изучения почвенного покрова. М.: Геос, 2003. – 536 с.
10. Novikoff A. The concept of integrative levels and biology // *Science*. – 1945. – V. 101. – P. 209–215.
11. Openshaw S., Taylor P. A million or so correlation coefficients: three experiments on the modifiable areal unit problem // *Statistical Applications in the Spatial Sciences* / Ed. by N. Wrigley. – London: Sion, 1979. – P. 127–144.
12. Schneider D.C. The Rise of the Concept of Scale in Ecology // *BioScience*. – July 2001. – V. 51. – № 7. – P. 545–553. DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051%5B0545:TROTCO%5D2.0.CO;2.
13. Тюрюканов А.Н., Федоров В.М. Н.В. Тимофеев-Ресовский: Биосферные раздумья. – М.: РАЕН, 1996. – 368 с.
14. Пузаченко Ю.Г. Глобальное биологическое разнообразие и его пространственно-временная изменчивость // *Современные глобальные изменения природной среды*. – М.: Научный мир, 2006. – Т. 2. – 696 с.
15. Рац М.В. Структурные модели в инженерной геологии. – М.: Недра, 1973. – 216 с.
16. Самсонова В.П. Пространственная изменчивость почвенных свойств. На примере дерново-подзолистых почв. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 160 с.

17. Хохлюк А.П. Гетероземы (специфические почвенные образования). – Владивосток: ДВО ПОД РАН, 2006. – 220 с.
18. Soil Survey Division Staff. 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18. 188 p.
19. Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
20. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
21. Zakharchenko A.V., Zakharchenko N.V. Three-Dimensional Surface Morphometry of Soil Horizons in Field Studies // Eurasian Soil Science. – 2006. – V. 39. – № 2. – P. 134–140. DOI: 10.1134/S1064229306020037.
22. Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишков, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
23. Захарченко А.В. Естественное восстановление антропогенно-измененных почв // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2005. – № 7. – С. 115–122.
24. Выявление первичной кусковатости (фрустумации) горных пород с помощью лазерной ультразвуковой экоскопии, фотолюминесценции и ряда других методов изучения минерального вещества / М.Ю. Поваренных, В.А. Рассулов, В.Н. Иньков и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 6. – С. 223–232.
25. Захарченко А.В. Вейвлет анализ мощности аккумулятивно-гумусового слоя почвенного покрова под линией электропередачи // Properties of matter in the focus of attention of modern theoretical doctrines. The results of the LXXXVIII International Research and Practice Conference and II stage of the Championship in Technical sciences, Architecture and Construction. – London, August 28 – September 02, 2014. – London: IASHE, 2014. – P. 37–40. DOI: <http://dx.doi.org/10.18007/gisap:ess.v0i7.1091>.
26. Захарченко А.В. Пространственная сопряженность морфологических поверхностей почв // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2007. – № 300 (II). – С. 146–153.
27. Захарченко А.В. Характеристики трещинной сети в зависимости от экологических условий земель лесных и линий электропередачи // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 10. – С. 392–397.
28. Phillips J.D., Marion D.A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas // Geoderma. – 2005. – V. 124. – P. 73–89. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.04.004.
29. Soil mixing and genesis as affected by tree uprooting in three temperate forests / P. Šamonil, P. Daník, R.J. Schaetzl, I. Vašicková, M. Valtera // European Journal of Soil Science. – May 2015. – V. 66. – P. 589–603. DOI: 10.1111/ejss.12245.
30. Disturbances can control fine-scale pedodiversity in old-growth forests: is the soil evolution theory disturbed as well? / P. Šamonil, I. Vašicková, P. Danek, D. Janík, D. Adam // Biogeosciences. – 2014. – V. 11. – P. 5889–5905. DOI: 10.5194/bg-11-5889-2014.

Поступила 10.03.2016 г.

Информация об авторах

Захарченко А.В., доктор биологических наук, профессор кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Алексеев В.И., доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления Института систем управления и информационных технологий Югорского государственного университета.

Ипатова Д.В., студентка кафедры общей геологии и землеустройства Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 631.471

HIERARCHICAL CONCEPT OF SOIL HETEROGENEITY AND PLANNING THE SCALE OF INVESTIGATIONS

Alexandr V. Zakharchenko¹,

zakh@ptu.ru

Valeriy I. Alexeev²,

v_alekseev@ugrasu.ru

Darya V. Ipatova¹,

ipatovadasha@gmail.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Yugra State University,
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

Relevance. Soil heterogeneity, both natural and that occurred owing to undercarriages, should be proportionated to the scale of the study. The soil cover of the sanitary protection zone of a transmission line is considered as a hierarchical system. There is natural heterogeneity and anthropogenic degraded anthropogenic soils in the soil cover. The registration of degraded soils is the relevant issue.

The main aim of the study is to establish relation based on wavelet analysis between the hierarchical structure of soil cover and the size of soil individual to improve the taxonomic division and to determine the mapping scale of mechanically disturbed soils.

The methods used in the study. Calculations were carried using wavelet analysis based on phase-frequency characteristics realized in Matlab 7.1 package-based functions gauss 5 (cgau5). Wavelet analysis compares sequentially oscillating cycles of a discrete function with the model cycle. Model cycle changes size consistently. Measurement of humus horizon depth was used as a discrete function. Humus horizon depth ($N=1826$) was measured on the wall of 67 m length trench, crossing the sanitary protection zone of a transmission line of 500 kV. The ideas of F. Kozlovskiy and Fourier analysis were taken as the base for determining the sizes of soil individual.

The results. Wavelet analysis allows us to identify the hierarchical structure of soil heterogeneity. The authors have considered the asymmetry of the phase-frequency diagram and proved the calculation of soil individual sizes; substantiated and gave recommendations to study scale-effect polypedons of anthropogenic soils.

Conclusion. The authors determined the system of hierarchical cycles of smaller sizes which can correspond to the individuals of lower taxonomic units, which were not defined in the existing soil classifications. The asymmetry phase-frequency characteristics of the soil heterogeneity was shown. It was ascertained that at different levels of hierarchy the frequency of occurrence of soil individuals is proportional to a square root of linear dimension. The authors determined the dependences of cycle amount on size and observation scale and proved the calculation of the observation scale grid to study anthropogenically disturbed soils of the sanitary protection zone. In the formation of a network of monitoring observations for the type of sod-podzolic soils it is recommended to set the distance between the observations of soil less than or equal to the size of the individual soil – 450–500 meters.

Key words:

Humus horizon, soil individual, wavelet, phase-frequency, scale, hierarchy, anthropogenic soils, modifiable areal unit problem, MAUP, 500 kilovolt transmission lines.

REFERENCES

1. Wu J., Li H. Concepts of scale and scaling. *Scaling and Uncertainty Analysis in ecology*. Netherlands, Springer, 2006. pp. 3–16. DOI: 10.1007/1-4020-4663-4_1.
2. Zinck J.A., Metternicht G., Bocco G., Del Valle H.F. *Geopedology. An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*. Switzerland, Springer International publishing, 2016. 549 p. DOI: 10.1007/978-3-319-19159-1_1.
3. Gao P., Geissen V., Temme A., Ritsema C.J., Mu X., Wang F. A wavelet analysis of the relationship between Loess Plateau erosion and sunspots. *Geoderma*, 2014, vol. 213, pp. 453–459. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.08.028.
4. Lin Z.S., Bian W.L., You W.H. The wavelets and hierarchies of the climate system. *Meteorology and Atmospheric Physics*, March 1996, vol. 61, pp. 19–26.
5. Alekseev V.I. Analysis and forecasting of cyclic time ranges using wavelet neural network and unclear inference rules. *Bulletin of Ugra State University*, 2013, Iss. 3 (30), pp. 3–10. In Rus.
6. Markov M.A. *O prirode materii* [Matter nature]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 216 p.
7. Rozanov B.G. *Morfologiya pochv* [Soil morphology]. Moscow, Akademicheskii prospect Publ., 2004. 431 p.
8. Dmitriev E.A. *Teoreticheskie i metodologicheskie problemy pochvovedeniya* [Theoretical and methodological issues of soil science]. Moscow, GEOS Publ., 2001. 374 p.
9. Kozlovskiy F.I. *Teoriya i metody izycheniya pochvennogo pokrova* [Theory and methods of studying soil cover]. Moscow, GEOS Publ., 2003. 536 p.
10. Novikoff A. The concept of integrative levels and biology. *Science*, 1945, vol. 101, pp. 209–215.
11. Openshaw S., Taylor P. A million or so correlation coefficients: three experiments on the modifiable areal unit problem. *Statistical Applications in the Spatial Sciences*. Ed. by N. Wrigley. London, Slon, 1979. pp. 127–144.
12. Schneider D.C. The Rise of the Concept of Scale in Ecology. *Bio-Science*, July 2001, vol. 51, no. 7, pp. 545–553. DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051 % 5B0545: TROTCO% 5D2.0.CO;2.

13. Tyuryukanov A.N., Fedorov V.M. *N.V. Timofeev-Resovskiy: biosfernye razdumya* [N.V. Timofeev-Resovskiy: biospheric thinking]. Moscow, RAEN Publ., 1996. 368 p.
14. Puzachenko Yu.G. Globalnoe biologicheskoe raznoobrazie i ego prostranstvenno-vremennaya izmenchivost [Global biological variety and its space-time instability]. *Sovremennoe globalnoe izmenenie prirodnoy sredy* [Current global change of environment]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2006. Vol. 2, 696 p.
15. Rats M.V. *Strukturnye modeli v inzhenernoy geologii* [Structural models in engineering geology]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 216 p.
16. Samsonova V.P. *Prostranstvennaya izmenchivost pochvennykh svoystv. Na primere drevno-podzolistykh pochv* [Spatial instability of soil properties. By the example of sod-podzolic soils]. Moscow, LKI Publ., 2008. 160 p.
17. Hohlyuk A.P. *Geterozemy (spetsificheskie pochvennye obrazovaniya)* [Hetero-soils (specific soil formations)]. Vladivostok, DVO POD RAN Press, 2006. 220 p.
18. Soil Survey Staff, Supplement to Agr. Handbook 18, *Soil Survey manual*. Dept. Agr., U.S. Govt. Printing Office, Washington, 1962. 188 p.
19. Dyakonov V., Abramenkova I. *MATLAB. Obrabotka signalov i izobrazheniy. Spetsialny spravochnik* [MATLAB. Processing signals and images. Special reference book]. St-Petersburg, PITER Publ., 2002. 608 p.
20. Malla S. *Veyvlety v obrabotke signalov* [Wavelets in signal processing]. Moscow, Mir Publ., 2005. 671 p.
21. Zakharchenko A.V., Zakharchenko N.V. Three-Dimensional Surface Morphometry of Soil Horizons in Field Studies. *Eurasian Soil Science*, 2006, vol. 39, no. 2, pp. 134–140. DOI: 10.1134/S1064229306020037.
22. Shishkov L.L., Tonkonogov V.B., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk, Oykumena Publ., 2004. 342 p.
23. Zakharchenko A.V. Natural restoration of anthropogenic-changed soils. *Tomsk State Pedagogical Bulletin*, 2005, no. 7, pp. 115–122. In Rus.
24. Povarennykh M.Yu., Rassulov V.A., Inkov V.N. Determination of rock primary lumpiness by laser ultrasound echoscopy, photoluminescence and a number of other methods for studying minerals. *GIAB*, 2008, no. 6, pp. 223–232. In Rus.
25. Zakharchenko A.V. Wavelet analysis of depth accumulative humus layer soils for Transmission line. Properties of matter in the focus of attention of modern theoretical doctrines. *The results of the LXXXVIII International 5. Research and Practice Conference and II stage of the ChamSIOnship in Technical sciences, Architecture and Construction*. London, August 28 – September 02, 2014. London, IASHE, 2014. pp. 37–40.
26. Zakharchenko A.V. Spatial conjugation of soil morphological covers. *Tomsk State University Journal of Biology*, 2007, no. 300 (II), pp. 146–153. In Rus.
27. Zakharchenko A.V. Characteristic of crack network depending on ecological conditions of grounds in forest and transmission lines. *International journal of applied and fundamental research*, 2015, no. 10, pp. 392–397. In Rus.
28. Phillips J.D., Marion D.A. Biomechanical effects, lithological variations, and local pedodiversity in some forest soils of Arkansas. *Geoderma*, 2005, vol. 124, pp. 73–89. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.04.004.
29. Šamonil P., Daník P., Schaetzl R. J., Vašicková I., Valtera M. Soil mixing and genesis as affected by tree uprooting in three temperate forests. *European Journal of Soil Science*, May 2015, vol. 66, pp. 589–603. DOI: 10.1111/ejss.12245.
30. Šamonil P., Vašicková I., Danek P., Janík D., Adam D. Disturbances can control fine-scale pedodiversity in old-growth forests: is the soil evolution theory disturbed as well? *Biogeosciences*, 2014, vol. 11, pp. 5889–5905. DOI: 10.5194/bg-11-5889-2014.

Received: 10 March 2016.

Information about the authors

Alexandr V. Zakharchenko, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valeriy I. Alexeev, Dr. Sc., professor, Yugra State University.

Darya V. Ipatova, student, National Research Tomsk Polytechnic University.