

ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ВАРИИРОВАНИЯ ПОЧВЕННЫХ СВОЙСТВ ЛУГОВЫХ АГРОЦЕНОЗОВ КАРЕЛИИ ПРИ ПОСТАНТРОПОГЕННОМ РАЗВИТИИ

Пространственное варьирование почвенных свойств в ландшафте определяется множеством факторов и процессов, происходящих в различных масштабах. В представленной работе для количественной оценки характеристик пространственного варьирования и их отношению к различным факторам использовались методы классической статистики и геостатистики. Установлено, что после вывода полей из севооборотов пространственная вариабельность снижается, что указывает на преимущественно антропогенный генезис неоднородности почв в агроценозах средней тайги Карелии.

Ключевые слова: почвы; пространственная вариабельность; геостатистика.

Введение

Пространственное варьирование признаков почвы определяется целым рядом факторов, часть из которых могут иметь случайный характер, а другие демонстрируют определенную регулярность в пространстве. Соответственно, пространственная неоднородность почвы имеет двойственную природу, когда можно выделить регулярные, закономерные составляющие, и случайные компоненты.

Пространственное варьирование агрохимических свойств почв на сельскохозяйственном угодье есть результат действия совокупности естественных процессов и практики землепользования. Существует два основных взгляда на антропогенное воздействие. В частности, говоря об агрохимических характеристиках, ряд авторов утверждает, что внесение удобрений, повышая средний уровень содержания питательных веществ, приводит к возрастанию пространственной вариабельности этих показателей, причем в такой степени, что варьирование, обусловленное естественными факторами, составляет лишь малую долю антропогенного. Другие исследователи, напротив, отмечают гомогенизацию почвенных свойств при сельскохозяйственной обработке. Таким образом, единой точки зрения в этом вопросе не существует.

Неоднородность почвенного покрова в пределах отдельных сельскохозяйственных угодий во многом определяется естественными причинами: рельефом, пестротой почвенного покрова, подстилающими породами (Важенин и др., 1961). Однако даже простая обработка почвы часто является причиной возрастания ее неоднородности. Суще-

ственную неоднородность может вызвать также внесение извести, гипса, удобрений, пестицидов и других веществ, поступление которых никогда не бывает выровненным (Брехова, Щеглов, 1997; Стрелкова и др., 1982; Paz-González et al., 2000). В результате всех подобных воздействий неоднородность почвенного покрова сельскохозяйственных угодий оказывается существенно более выраженной, чем у почвенного покрова целинных аналогов. Таким образом, решающим фактором, обусловившим неоднородность в содержании элементов питания в пахотном слое окультуренных почв, является не столько различие в видах почв, сколько характер производственной деятельности человека – господствовавшая система земледелия и система удобрения. Кроме того, высокое пространственное варьирование значений агрохимических показателей часто объясняется тем, что в пределах одного хозяйства в поля севооборотов включаются участки с различной историей, а также тем, что часто на одном и том же поле одновременно возделывается не одна, а несколько культур, неодинаково обрабатываемых и по-разному удобряемых (Goovaerts, 1998). С другой стороны, при правильной организации мероприятий (орошение, известкование, мелиорация, внесение удобрений), очень контрастные территории могут превращаться в однородные.

Анализ литературных источников показал, что изменение варьирования различных почвенных показателей при окультуривании земель происходит достаточно сложным образом. Некоторые параметры уменьшают варьирование за счёт гомогенизации участка, например, выравнивается ёмкость катионного обмена, реже – кислотность,

содержание органического углерода. Другие параметры, например, содержание азота, фосфора и пр., в основном зависят от внесения удобрений и увеличивают свое варьирование при окультуривании земель. В то же время, кислотность и содержание органического углерода также могут увеличивать варьирование при окультуривании, если при этом вносились органические или известковые удобрения, либо резко дифференцировались условия минерализации органического вещества (Михеева, 1997; Стрелкова и др., 1982; Geypens et al., 1999; López-Granados et al., 2002). В работах (Небольсин, Небольсина, 2010; Шильников и др., 2003) установлено, что пахотные почвы не находятся в равновесном состоянии и без применения средств химизации постепенно деградируют.

В последнее время для Карелии характерно сокращение площади сельскохозяйственных полей, выведение полей из севооборота, перевод из сенокосных угодий в пастбища. В связи с этим важным является вопрос изменения почвенных свойств после выведения полей из севооборота. Задачей работы было оценить влияние смены практик землепользования на пространственное варьирование почвенных свойств.

Материалы и методы исследования

Нами исследовалась динамика пространственного варьирования уровня кислотности и содержания органического углерода. Отбор почвенных образцов проводился летом 2003 и 2013 гг. на участке площадью 50 га. Преобладающие почвы: агроподзолы, агроторфяно-глеевые почвы и мощные торфяные почвы. Поле было дренировано в 1963 г. и до 2005 г. использовалось как сенокосное угодье. По состоянию на 2003 г. преобладающая культура – *Dactylis glomerata*.

Образцы отбирались в пахотном горизонте по случайно-регулярной сетке с шагом 100 м. Все почвенные образцы были проанализированы на содержание органического углерода (по Тюрину) и значений pH_{KCl} потенциометрически. Проводился классический статистический анализ выборки, сравнительный анализ группы выборок, корреляционный и регрессионный анализ (Дмитриев, 1995).

Пространственная изменчивость почвенных показателей была исследована с помощью гео-статистических методов (анализ вариограмм и точечный кригинг). Для оценки закономерностей пространственной вариабельности изучаемых почвенных свойств использовался метод вариографии (Демьянов, Савельева, 2010; Джонгман и др., 1999; Burgess, Webster, 1980). Дисперсия рассчитывалась по формуле:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1).$$

где z — варьирующая величина, $z(x_i)$ и $z(x_i + h)$ — результаты измерений в точках x_i и $x_i + h$, а $N(h)$ — количество пар точек, разделенных расстоянием h (которое обычно называется лагом). Величина $\gamma(h)$ является средней мерой сходства значений признака в точках, разделенных расстоянием h . Значения дисперсии не зависят от положения точек в пространстве, а зависят только от расстояния h между ними.

На основании полученных данных строились семивариограммы — графики, описывающие зависимость среднего квадрата разности значений показателя (дисперсии) от расстояния между точками, где этот показатель был измерен. Для оценки степени пространственной связности рассчитывалось процентное отношение наггета к порогу. Если это отношение $\leq 25\%$, то переменная считалась сильно пространственно зависимой, если отношение между 25 и 75% — пространственная зависимость интерпретировалась как средняя, и если $>75\%$ — слабая пространственная зависимость (Cambardella et al., 1994).

Для построения картограмм использовался кригинг. Кригинг — это процедура получения в некотором смысле оптимальной оценки значения некоторой случайной величины в точке контура, где ее опробование (измерение) не производилось, по данным о значениях той же величины в других точках того же контура, более или менее близких к рассматриваемой, где измерения выполнялись. Конечной целью кригинга является построение линий изоарифм на данном контуре, т.е. линий равных значений средних арифметических рассматриваемой случайной величины, некоторым оптимальным образом проведенных между точками опробования (Burgess, Webster, 1980).

В кригинге веса подбираются таким образом, чтобы оценка искомого значения была несмещенной, а дисперсия оценки — минимальной. Чем ближе конкретная точка опробования к точке или области, для которой нужно определить значение признака, тем больший вклад ее значение вносит в искомое. Вес каждой точки определяется по вариограмме. Существует несколько видов кригинга. В данном исследовании использовался точечный кригинг. Он определяет значение показателя в каждой конкретной точке (Burgess, Webster, 1980).

Статистическая обработка результатов проведена с использованием программы StatGraphics. Для расчета и построения семивариограмм нами

использовался пакет программ Variowin, а для построения картограмм пространственного распределения по предсказанным значениям – пакет SURFER Version 6.02 software.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время (начиная с 2005 г.) участок не обрабатывается и развивается как естественный травостой. В составе агроценоза доминируют *Dactylis glomerata*, *Elymus repens* и *Cirsium arvense*. В восточной части участка, на мощных торфяниках, отмечен процесс вторичного заболачивания. Доминирующие виды в этой части *Salicaceae* и *Chamaenerion*. Таким образом, развитие биологического разнообразия связано не только с отсутствием влияния хозяйственной деятельности человека, но и с почвенно-климатическими условиями. На торфяных почвах появляются гидрофитные растения, на дерново-подзолистых почвах происходит развитие суходольного луга с соответствующей растительностью.

Классический статистический анализ результатов почвенных исследований показал, что изменчивость содержания органического углерода была высокой. Диапазон значений был достаточно широк и коэффициент вариации был выше 60%, что свидетельствует о неравномерном распределении содержания органического углерода в пахотном слое. Высокий уровень изменчивости может быть вызван неравномерным содержанием минеральных и торфяных материалов в пахотном горизонте окультуренных почв. Для значений pH

Таблица. Статистические характеристики почвенных показателей в различные годы исследования

	pH _{KCl} (2003)	pH _{KCl} (2013)	C, % (2003)	C, % (2013)
Среднее значение	5.00	5.58	13.64	12.77
Медиана	5.00	5.63	10.38	11.07
Минимум	3.80	4.32	2.18	2.06
Максимум	6.30	6.55	33.06	28.22
Нижний квартиль	4.50	5.13	6.42	6.51
Верхний квартиль	5.40	6.09	18.69	20.68
Дисперсия	0.38	0.37	90.45	64.78
Коэф. вариации, %	12.27	10.85	69.71	63.05
Экцесс	-0.57	-0.84	-0.74	-1.13
Ассиметрия	0.13	-0.19	0.78	0.41

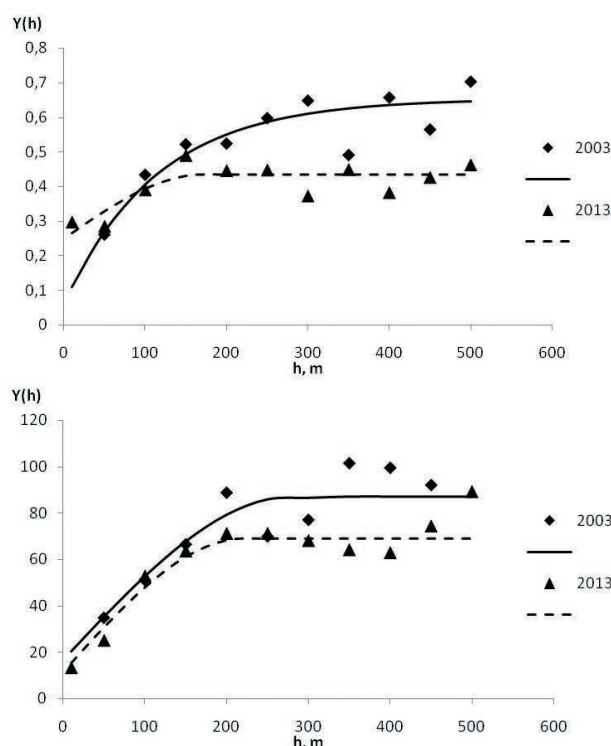


Рис. 1. Вариограммы для уровня кислотности (а) и содержания органического углерода (б) в различные годы исследования

коэффициент вариации составил 10-12 % (табл.).

Сравнительный анализ данных показал, что не было статистически значимого различия средних величин, стандартных отклонений и медиан содержания органического углерода и уровня кислотности в разные годы. Основные изменения произошли за счет снижения размаха значений (разность между максимальным и минимальным значением) и коэффициента вариации.

Регрессионный анализ показал, что существует значимое (99%) соотношение между кислотностью и расположением точек пробоотбора, а также между содержанием органического углерода и расположением точек пробоотбора (координаты точек). Множественный коэффициент детерминации составил в разные годы (2003 и 2013) 16.2 и 14.6 % для значений pH и 44.2 % и 32.6% для содержания органического углерода. Следует заметить, что направление тренда как в различные годы, так и для различных почвенных свойств практически совпадает. Как правило, области со сходным характером тренда полученным в различные годы, можно считать областями относительно устойчивого совокупного влияния природных факторов. В нашем исследовании к таким факторам следует отнести рельеф (на участке имеется небольшой склон) и закономерное изменение почв от торфяно-минеральных к торфяным в направлении от леса к центру низины.

Анализ вариограмм показал, что на некуль-

вируемом в течение нескольких лет поле происходило сглаживание пространственной неоднородности кислотности на небольших расстояниях (рис. 1а). Возрастает доля случайного варьирования. Степень пространственной зависимости изменилась с сильной (9%) до средней (57%).

Варьирование значений содержания органического углерода в разные годы было сходно. Однако для вариограммы на некультивируемом участке было отмечено меньшее значение наггета и ранга, что свидетельствует об общем снижении уровня варьирования, хотя степень пространственной зависимости оставалась достаточно сильной – 16 и 19% (рис. 1б).

С помощью кригинга по точечным данным были получены непрерывные наборы данных по уровню кислотности и содержанию органического углерода на всем поле. Были построены интерполяционные картограммы почвенных показателей для каждого года исследования и затем были построены карты динамики почвенных свойств как разность между двумя наборами данных (рис. 2).

Установлено, что изменения носят неоднородный характер. В западной части участка, в агроцено-

мах торфяно-глееземах продолжает идти минерализация торфа, несмотря на перевод под залежь. При биохимическом разложении растительных остатков процентное содержание углерода возрастает, увеличивается отношение C:N и уменьшаются значения pH. Напротив, в мощном торфянике в восточной части участка ход почвообразования меняется. Там торф активно разлагался при использовании, а после перевода в залежь процессы торфонакопления (то есть поступления растительных остатков с низким содержанием углерода) начинают перевешивать процессы деструкции. Таким образом, на большей части участка происходит снижение содержания органического углерода и уровня кислотности.

Выводы

В ходе исследований пространственной неоднородности и временной динамики почвенных свойств, отвечающих за продуктивность сеяных лугов южной части Республики Карелия было установлено, что наибольшая пространственная вариабельность наблюдается для содержаний органического углерода. После вывода полей из севооборотов пространственная вариабельность снижается, что указывает на преимущественно антропогенный генезис неоднородности почв в агроценозах средней тайги Карелии. Скорости изменения почвенных свойств также неоднородны.

Данная работа проводилась с целью повышения эффективности использования почвенных ресурсов региона. Наши предварительные рекомендации заключаются, прежде всего, в том, что особое внимание следует обратить на равномерность внесения удобрений и извести, поскольку современная ситуация с неоднородностью почвенных свойств связана преимущественно с несоблюдением агротехнологий. Вывод в залежь части полей имеет позитивное значение для фиксации углерода и поддержания биологического разнообразия.

Исследования выполнены в рамках государственного задания (темы №0221-2014-0009, № 0221-2015-0006).

Список литературы

1. Брехова Л.И., Щеглов Д.И. Воздействие антропогенного фактора на пространственную изменчивость содержания гумуса в профиле черноземов центральной России // Проблемы антропогенного почвообразования / Тез. докл. междунар. конф. М., 1997. С. 67-70.
2. Важенин И.Г., Музычкин Е.Т., Прохорова З.А., Алешина Т.Н. О методике составления крупномасштабных почвенно-агрохимических картограмм в целях применения удобрений // Почвоведение. 1961. № 4. С. 1-13.

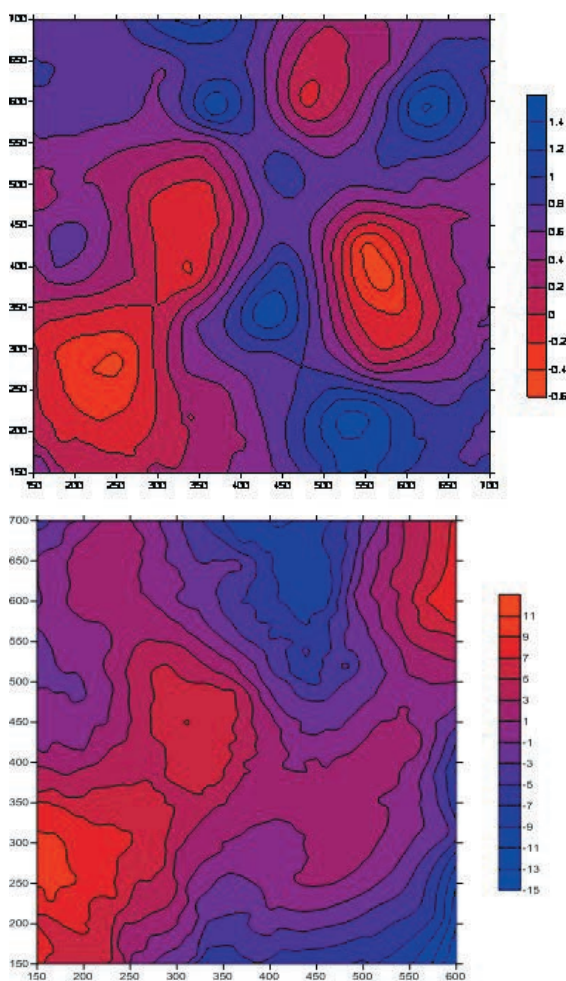


Рис. 2. Картограммы динамики изменения почвенных свойств: а – $pH_{кcp}$
б – содержание органического углерода

3. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геоestatистика. Теория и практика. М.: Наука, 2010. 328 с.
4. Джонгман Р.Г.Г., Тер Браак С.Дж.Ф., Ван Тонгерен О.Ф.Р. Анализ данных в экологии сообществ и ландшафтов / Под ред. А.Н. Гельфана, Н.М. Новиковой, М.Б. Шадринной. М.: РАСХН, 1999. 306 с.
5. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во МГУ, 1995. 318 с.
6. Михеева И.В. Изменение пространственной вариабельности свойств почвы при антропогенном воздействии // Почвоведение. 1997. № 1. С. 102-104.
7. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Известкование почв. СПб. 2010. 253 с.
8. Стрелкова А.А., Марченкова Н.Е., Перевозчикова Е.М., Кябелева Г.К., Амозова М.П., Павлова Н.Н. Пространственное варьирование агрохимических свойств пахотных торфяных низинных почв // Почвы Карелии и вопросы их мелиорации. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1982. С. 49-62.
9. Шильников И.А., Аканова Н.И., Баринев В.Н. Методика прогнозирования кислотности почв и расчет баланса кальция в земледелии Нечерноземья Российской Федерации. М., 2003. 24 с.
10. Burgess T.M., Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I: The semi-variogram and punctual kriging // J. Soil Sci. 1980. V. 31, №2. P. 315-333.
11. Cambardella C.A., Moorman T.B., Parkin T.B., Karlen D.L., Novak J.M., Turco R.F., Konopka A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils // Soil Sci. Soc. America J. 1994. V. 58. P. 1501-1511.
12. Geypens M., Vanongeval L., Vogels N., Meykens J. Spatial variability of agricultural soil fertility parameters in a gleyic podzol of Belgium // Precip. Agric. 1999. V. 1. P. 319-326.
13. Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties // Biol. Fertil. Soil. 1998. V. 27. P. 315-334.
14. López-Granados F., Jurado-Expósito M., Atenciano S., García-Ferrer A., Sánchez de la Orden M., García-Torres L. Spatial variability of agricultural soil parameters in southern Spain // Plant Soil. 2002. V. 246. P. 97-105.
15. Paz-González A., Vieira S. R., Taboada Castro M. T. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon // Geoderma. 2000. V. 97. P. 273-292.

V.A. Sidorova. Dynamics of the spatial variability of soil properties of grassland agrocoenosis of Karelia during post-anthropogenic development.

Spatial variability of soil properties in the landscape is determined by multiple factors and processes occurring at various scales. The methods of classical statistics and geostatistics to quantify the characteristics of the spatial variation and their relation to the various factors were used in this paper. It was established that after the withdrawal of the fields from the rotations spatial variability is reduced, indicating a predominantly anthropogenic origin of soils heterogeneity in agrocoenoses of the middle taiga of Karelia.

Keywords: soils; spatial variability; geostatistics.