

Жуков А. В.

**ГИС-ПОДХОД ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ
ОБЫЧНЫХ И СДВОЕННЫХ КОЛЕС НА ТВЕРДОСТЬ ПОЧВЫ**

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Украина

E-mail: Zhukov_dnepr@rambler.ru

Применение ГИС-подхода позволило установить, что обычные колеса машинно-тракторных агрегатов осуществляют значительное воздействие на почву, которое превышает по своим размерам видимые границы колеи колес. Это воздействие проявляется в увеличении твердости почвы на 100–155 % в сравнении с контролем на глубине 0–10 см и на 20–30 % на глубине 45–50 %. Нельзя исключить того, что влияние колес продолжается глубже, чем были проведены испытания. Критическое для культурных растений значение твердости почвы в 3 МПа под воздействием обычных колес сельскохозяйственной техники приближается практически к поверхности. Характер профильных изменений твердости в различных зонах воздействия колес позволяет предположить длительный период релаксации почвы для достижения фоновых значений твердости. Для установления конкретных показателей динамики необходимы дальнейшие исследования. Негативное влияние переуплотнения не ограничивается только ухудшением условий роста корневых систем растений. Возможно нарушение процессов перемещения влаги в почве, ускоренное испарение и замедленные процессы фильтрации и инфильтрации, разрушение агрегатной структуры, активизация эрозионных процессов. Понимание этих процессов даст возможность объемного понимания реального воздействия ходовых систем машинно-тракторных аппаратов на почву. Зона интенсивного воздействия сдвоенных колес ограничена верхними почвенными слоями (0–15 см). Важнейшей особенностью воздействия сдвоенных колес является отсутствие переуплотнения выше критических уровней. Нельзя исключать возможного позитивного воздействия умеренного уплотнения почвы под воздействием сдвоенных колес для роста сельскохозяйственных культур и сохранения влаги в почве. Вероятным является кумулятивный негативный эффект на почву пересекающихся колеи транспортных средств. Длительный период релаксации почвы после антропогенной трансформации может создавать сеть следов транспортных средств на поле. В зоне пересечения следов негативные эффекты значительно увеличиваются.

Ключевые слова: твердость почвы, ГИС-технологии, влияние техники



Zhukov A.V.

**INFLUENCE OF USUAL AND DUAL WHEELS ON SOIL PENETRATION
RESISTANCE: THE GIS-APPROACH**

Oles Honchar Dnepropetrovsk National University, Ukraine

E-mail: Zhukov_dnepr@rambler.ru

GIS-APPROACH application has allowed establishing that usual wheels of machine-tractor units carry out considerable influence on soil which exceeds visible borders of a track of wheels on the dimensions. This influence shows in augmentation of soil penetration resistance at 100-155 % in comparison with the control on depth of 0-10 cm and on 20-30 % on depth of 45-50 %. It is impossible to exclude that influence of wheels proceeds more deeply, than tests have been conducted. Critical for cultivated plants value of soil penetration resistance in 3 MPa under the influence of usual wheels of agricultural machinery comes nearer practically to a surface. Character of profile changes of hardness in various regions influences of wheels allows assuming the long season of a relaxation of soil for achievement of background values of soil penetration resistance. The further researches are necessary for an establishment of concrete indicators of dynamics. Negative influence of an overstocking does not confine only deterioration of conditions of growth of assemblages of rootlets of plants. Infringement of processes of moving of moisture in the soil, the accelerated evaporation and the slowed down processes of a filtration and an infiltration, destruction of modular frame, activation of erosive processes is possible. The understanding of these processes will give the chance volume understanding of real influence of running systems of machine-tractor devices on bedrock. Region intensive influence of dual wheels is circumscribed by the top soil layers (0-15 cm). The major feature of influence of dual wheels is absence of an overstocking above critical levels. It is impossible to exclude possible positive influence of moderate inspissions of soil under the influence of dual wheels for growth of agricultural crops and moisture conservation in soil. The cumulative negative effect on soil crossed vehicles traces is probable. The long season of a relaxation of soil after anthropogenic transformation can create a network of traces of vehicles in the field. In region crossings of traces negative effects considerably increase.

Keywords: hardness of bedrock, GIS-TECHNOLOGY, technique influence

Жуков О. В.

**ГІС-ПІДХІД ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ
ЗВИЧАЙНИХ І ЗДВОЄНИХ КОЛІС НА ТВЕРДІСТЬ ҐРУНТУ**

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна

E-mail: Zhukov_dnepr@rambler.ru

Застосування ГІС-підходу дозволило встановити, що звичайні колеса машинно-тракторних агрегатів здійснюють значний вплив на ґрунт, що перевищує за своїми розмірами видимі границі колії коліс. Цей вплив проявляється у збільшенні твердості ґрунту на 100-155 % порівняно з контролем на глибині 0–10 см і на 20–30 % – на глибині 45–50 %. Не можна виключити того, що вплив коліс триває глибше, ніж були проведені випробування. Критичне для культурних рослин значення твердості ґрунту в 3 МПа під впливом звичайних коліс сільськогосподарської техніки наближається практично до поверхні. Характер профільних змін твердості в різних зонах впливу коліс дозволяє припустити тривалий період релаксації ґрунту для досягнення фонових значень твердості. Для встановлення конкретних показників динаміки необхідні подальші дослідження. Негативний вплив переущільнення не обмежується тільки погіршенням умов росту корневих систем рослин. Можливе порушення процесів переміщення вологи в ґрунті, прискорене випаровування і вповільнені процеси фільтрації та інфільтрації, руйнування агрегатної структури, активізація ерозійних процесів. Розуміння цих процесів надасть можливості об'ємного розуміння реального впливу ходових систем машинно-тракторних апаратів на ґрунт. Зона інтенсивного впливу здвоєних коліс обмежена верхніми ґрунтовими шарами (0–15 см). Найважливішою особливістю впливу здвоєних коліс є відсутність переущільнення вище критичних рівнів. Не можна виключати можливого позитивного впливу помірного ущільнення ґрунту під впливом здвоєних коліс для росту сільськогосподарських культур і збереження вологи в ґрунті. Імовірним є кумулятивний негативний ефект на ґрунт пересічних колій транспортних засобів. Тривалий період релаксації ґрунту після антропогенної трансформації може створювати мережу слідів транспортних засобів на поле. У зоні перетинання слідів негативні ефекти значно збільшуються.

Ключові слова: твердість ґрунту, ГІС-технології, вплив техніки



Эффективная механизация сельского хозяйства является важнейшим фактором, который определяет его производительность (Tullberg et al., 2007). Большие машины являются оперативными, высокопроизводительными и менее трудозатратными (Antille et al., 2013). Исследования свидетельствуют о том, что тренд, который наблюдается последние несколько десятилетий, по применению и проектированию более крупных и мощных сельскохозяйственных машин, будет продолжаться в дальнейшем (Chamen et al., 1992; Kutzbach, 2000; Dain-Owens et al., 2012). Одним из недостатков тяжелой техники является её большой вес, который увеличивает риск повреждения почвы вследствие уплотнения (Raper, 2005). Эта особенность требует решения вопроса о наибольшем допустимом уровне воздействия на почву (Mosaddeghi et al., 2007). Применение тяжелого сельскохозяйственного оборудования приводит к увеличению возможности уплотнения глубоких слоев почвы, которое может сохраняться длительный период времени и которое сложно нейтрализовать (Håkansson, Petelkau, 1988; Alakukku, 1999). Почвенное уплотнение влияет на физические, химические и биологические свойства почвы и является одним из механизмов деградации сельскохозяйственных земель (Håkansson, Voorhees, 1998). При твердости почвы, которая превышает ЗМПа, рост корней растений не возможен (Taylor, Gardner, 1963; Taylor, Burnett, 1964; Camp, Lund, 1968). Снижение уплотнения почвы является очень дорогостоящей технологией (Spoor, Godwin, 1978, 1981; Chamen et al., 1990; Chamen et al., 2003).

В общем, увеличение размеров шин сопряжено со снижением давления на почву при поддержке данного веса на оси (Ageikin, 1987). Эта особенность также улучшает производительность техники и снижает деформацию почвы (Plackett, 1984). В сельскохозяйственных почвах уплотнение сопровождается также компрессией почвы в латеральном направлении (Koolen, Kuipers, 1983). Факторами, которые определяют результативность уплотнения почвы, являются почвенные условия во время движения техники, тип и интенсивность приложенных усилий, число проходов техники и их длительность (Alakukku, 1999). Сопротивление почвы сжатию зависит от ряда свойств, таких как гранулометрический состав и структура, содержание органического вещества, и, что особенно важно, влажность почвы (Koolen, Kuipers, 1983; Dawidowski, Lerink, 1990; Horn, Lebert, 1994). В почвах, которые находятся в состоянии не полного насыщения влагой, сопротивление сжатию уменьшается прогрессивно с увеличением содержания влаги (Lamandé, Schjønning, 2011). Для данного давления на почву, влияние на глубокие почвенные слои будет выше, если почва является более влажной (Salire et al., 1994; Alakukku, 1999). Поведение почвенной компрессии также зависит от начальной плотности сложения почвы, которая является одним из наиболее часто используемых маркеров уплотнения почвы (Håkansson, Lipiec, 2000). Почвы с низкой плотностью, как

правило, обладают низкой способностью противодействовать сдавливанию. Поэтому они подвержены большему уплотнению, чем почвы с большей плотностью сложения (Antille et al., 2013).

Твердость почвы является высокоинформативным маркером, который отражает физическое состояние почвенного тела и может быть использован для оценки уплотнения почвы под воздействием сельскохозяйственной техники (Медведев, 2009; Демидов и др., 2013). Твердость почвы демонстрирует сложные паттерны пространственной изменчивости (Жуков, Кунах, 2011; Жуков, Задорожная, 2013; Жуков и др., 2014; Кунах, Балдин, 2011). Для оценки особенностей пространственного варьирования твердости почвы разработаны технологии применения инструментов двумерной и трехмерной геостатистики (Кунах и др., 2011; Демидов и др., 2013; Жуков, Андрусевич, 2015). Актуальным также является применение байесовского подхода для оценивания геостатистик почвенных свойств (Жуков и др., 2015).

Цель работы: изучить характер влияния обычных и сдвоенных колес на твердость почвы.

МЕТОДЫ

Испытания проведены с тракторами John Deere 8310 с колесами 600/70R30 на передней оси и колесами 710/70 R42 – на задней оси. Использована система сдвигания колес ПАО «Кременчугский колесный завод». Испытания проведены на базе ТД ООО «Долинский» (Украина, Херсонская область, Чаплынский район).

Почва – темно-каштановая слабосолонцеватая на карбонатном лёссе. Гумусовый горизонт – 22–29 см, содержание гумуса в слое 0–40 см – 2,35–3,12 % (Лозовіцький, 2009).

В поперечном направлении от направления колеи был заложен полигон, в пределах которого производились измерения твердости почвы. Полигон состоит из 7 трансект, каждая трансекта составлена из 15 пробных точек. Расстояние между рядами в полигоне и точками в ряду составляет 0,5 м. Измерение твердости почв производились в полевых условиях с помощью ручного пенетрометра Eijkelkamp на глубину до 50 см с интервалом 5 см. Средняя погрешность результатов измерений прибора составляет $\pm 8\%$. Измерения производились конусом с размером поперечного сечения 1 см². В пределах каждой точки измерения твердости почвы производились в однократной повторности.

Точки отбора проб разделены на следующие категории: контроль, колея, обод, между колес и возле колеи. Колея – точка находится непосредственно в области воздействия колес техники, что на уровне нанорельефа обозначено как колея от транспортного средства. Обод – точка отбора проб наиболее близка к наружной границе колеи. Возле колеи – аналогичная позиция между колеями, которые остаются от колес. Между колес – средняя зона между колеями без



видимых нарушений нанорельефа. Таким образом, контроль – точки, которые не испытывают очевидной трансформации нанорельефа от движения транспортного средства и удаленные на расстояние не менее 1 м от колеи.

Испытания проведены для колеи, оставленной обычными колесами и сдвоенными колесами. Измерения произведены 29 октября.

Важным инструментом геостатистики является кригинг. Под кригингом понимается линейный предиктор по методу наименьших квадратов, который при определенных стационарных предположениях, нуждается, по меньшей мере, в информации о параметрах ковариации и функциональной форме для случайной функции, которая лежит в основе процесса. В большинстве техник геостатистики не известны, но кригинговый предиктор не принимает во внимание их неопределенности, а сделанные оценки считаются как истинные. Байесовский подход дает возможность инкорпорировать неопределенность параметров для пространственного предсказания, рассматривая параметры как случайные переменные (Diggle, Ribeiro, 2002).

Вариограмма является ключевым понятием в геостатистике (Minasny, McBratney, 2005). Знание точной математической формы вариограммы дает возможность количественного описания пространственной вариации (McBratney, Pringle, 1999) а также предсказания почвенных свойств на локальном или региональном уровнях (Minasny, McBratney, 2005). Вариограммы обычно рассчитываются по пространственным данным с помощью метода моментов и последующей подгонкой к теоретической модели эмпирической вариограммы с использованием нелинейного метода наименьших квадратов (Webster, Oliver, 2001).

Однако, метод моментов может давать ошибочные результаты, а обычно применяемые модели вариограмм (сферическая, экспоненциальная и гуассова) отличаются недостатком гибкости (Stein, 1999). Обычные модели предполагают определенную форму локального поведения пространственного поведения. Иначе говоря, на вариограмму накладывается предопределенное представление о локальном поведении (Minasny, McBratney, 2005).

Как альтернатива может рассматриваться класс моделей вариограмм Матерна, которые названы по имени шведского статистика Бертила Матерна (Matern, 1986). Модели Матерна обладают значительной гибкостью для моделирования пространственной ковариации и способны описать широкое разнообразие локальных пространственных процессов.

На основании этого, модели Матерна предложено использовать как общий подход для моделирования почвенных свойств (Minasny, McBratney, 2005).

Изотропная ковариационная функция Матерна имеет вид (Handcock, Stein, 1993; Stein, 1999):

$$F(h) = \frac{1}{2^{\nu-1}\Gamma(\nu)} \left(\frac{h}{r}\right)^{\nu} K_{\nu}\left(\frac{h}{r}\right),$$

где h – дистанция разделения; K_{ν} – модифицированная функция Бесселя второго типа порядка (Abramowitz, Stegun, 1972), Γ – гамма функция, r – радиус влияния или параметр дистанции ($r > 0$), который измеряет, как быстро корреляция затухает с дистанцией; ν – параметр сглаживания.

Модель Матерна характеризуется высокой гибкостью в сравнении со стандартными геостатистическими моделями ввиду наличия параметра сглаживания ν . Когда параметр ν мал ($\nu \rightarrow 0$) модель предполагает шероховатый пространственный процесс, если параметр ν велик ($\nu \rightarrow \infty$), то предполагается сглаженный пространственный процесс (Minasny, McBratney, 2005). При параметре $\nu = 0,5$ модель Матерна полностью соответствует экспоненциальной модели. При $\nu \rightarrow \infty$ модель Матерна соответствует Гауссовой модели. Если $\nu = 1$ то это соответствует функции Уайтла (Whittle, 1954; Webster, Oliver, 2001; Minasny, McBratney, 2005). Если радиус влияния r велик ($r \rightarrow \infty$), то пространственный процесс аппроксимируется степенной функцией, или лог-функцией или функцией Вейса если $\nu \rightarrow 0$ (de Wijs, 1951, 1953). Таким образом, модель Матерна может рассматриваться как генерализация ряда теоретических моделей вариограм (Minasny, McBratney, 2005).

Параметр ν , который определяет гладкость пространственного процесса, должен быть определен исходя полученных пространственных данных. Было проведено исследование природы пространственной зависимости сельскохозяйственных культур с использованием модели Матерна (McCullagh, Clifford, 2006). Исследование шестнадцати выборок данных по урожайности сельскохозяйственных культур свидетельствует о том, что радиус влияния r имеет тенденцию принимать большие значения, а параметр гладкости ν – малые значения. Был сделан вывод, что сельскохозяйственные пространственные процессы являются шероховатыми и предложена модель «*loi du terroir*» (закон места) – (соответствует геостатистической модели Вейса) с $r \rightarrow \infty$ и $\nu \rightarrow 0$, которую можно применять для всех исследованных сельхозкультур и для всех сезонов.

Обычной практикой в педометрии, а также в науках про Землю, сельскохозяйственной науке и биологии для оценки вариограммы является вычисление эмпирической вариограммы с помощью метода моментов с последующей подгонкой теоретической модели с помощью нелинейного метода наименьших квадратов (Minasny, McBratney, 2005). Альтернативный метод использует наибольшее правдоподобие (*maximum likelihood* – ML) или



максимальное правдоподобие с дополнительными ограничениями (*restricted maximum likelihood* – REML), который оценивает параметры модели непосредственно из данных, исходя из предположения о множественном нормальном распределении (Stein, 1999).

Сравнение различных методов оценки вариограмм показало, что метод моментов показывает такие же результаты, как и более вычислительно затратные ML и REML процедуры (Zimmerman, Zimmerman, 1991). Однако при некоторых обстоятельствах метод ML имеет преимущества перед методом моментов (Lark, 2000). Метод моментов дает худшие результаты при описании сглаженных процессов (Stein, 1999). К подобным результатам пришли Lophaven et al. (2002), которые подтвердили преимущества ML и REML процедур.

Перед проведением геостатистического оценивания производилась экстракция тренда, который описывается полиномом третьего порядка. Дальнейшие расчеты проводились с остатками полиномиальной модели. Для картографического отображения полученных пространственных моделей производился обратный синтез полиномиальной и геостатистических компонент варьирования изучаемых признаков.

Статистические расчеты проведены с помощью программы Statistica 7.0 и программной оболочки R (<http://www.R-project.org>). Двумерное отображение полученных моделей пространственного варьирования показателей твердости произведено в программе Surfer 11.2, а трехмерное – в программе Voxler 3.3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлено, что в агрозёмах без воздействия колёсной техники (в контроле) наблюдается постепенное увеличение твердости почвы по мере продвижения вниз по профилю (рис. 1). Твердость изменяется с уровня 1,2 МПа в слое 0–5 см до 7,03 МПа в слое 45–50 см. Различия между контрольными участками на двух полигонах статистически не достоверные. Наиболее резкий послойные различия отмечены в слое 10–15 см, после которого различия между слоями монотонно затухают.

В условиях воздействия колесного транспорта твердость почвы существенно возрастает. Это возрастание зависит от того, являются ли колеса обычными, либо они являются сдвоенными, а также от удаления почвы от колеи транспорта.

При воздействии обычных колес существенное увеличение твердости почвы отмечено непосредственно в слоях почвы под колеей, а также в наружном крае от границы колеи (условно – обод) (рис. 1, А). Уже в верхнем почвенном слое в колее твердость приобретает значение более 3 МПа.

Твердость 2,89 МПа отмечена в зоне обода. Следует отметить, что уровень твердости 3 МПа является граничным, который может преодолеть корневая

система культурных растений (Медведев, 2009). Скорость нарастания твердости по профилю в ситуации с влиянием колес на почву также наибольшая в слое 10–15 см, но дальнейшая изменчивость по профилю не является равномерно затухающей, как в контроле.

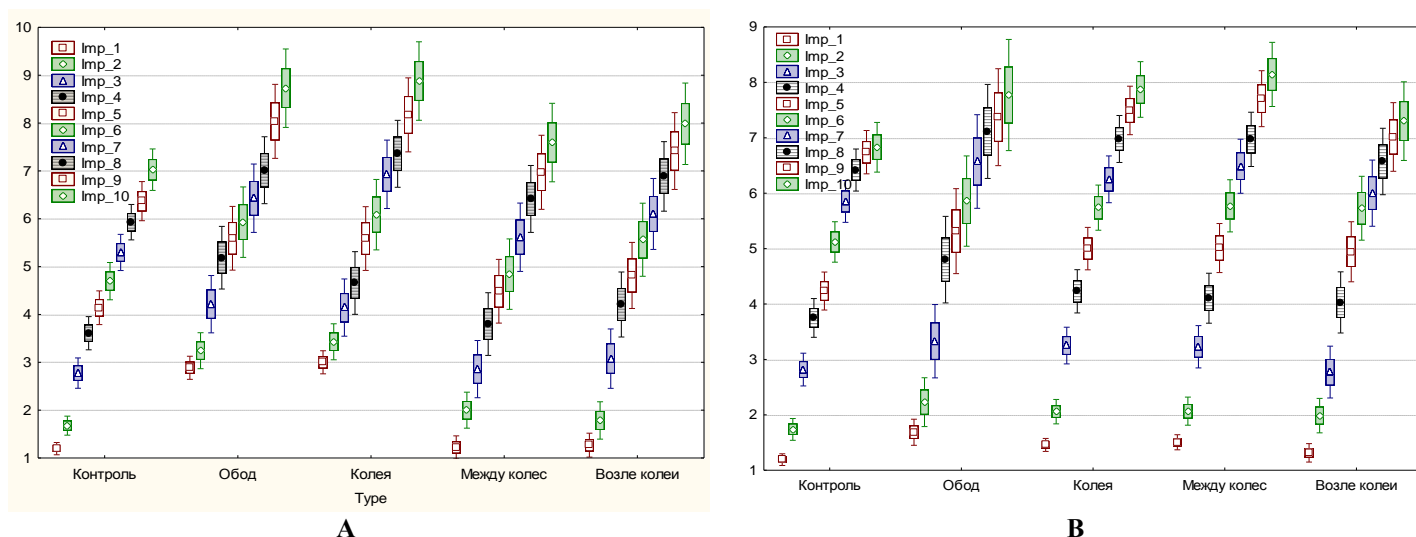


Рис. 1. Профильное распределение показателей твердости почвы (в МПа) в зависимости от степени удаления от колеи обычных (А) и двоянных колес (В)

При воздействии двоянных колес также отмечено увеличение твердости почвы в колее, но это возрастание гораздо меньше, чем в случае с обычными колесами (рис. 1, В). Важно отметить, что послойные изменения твердости в зоне колеи, обода, возле колес и между колес практически синхронны, что говорит о равномерном распределении нагрузки на почвенное тело в варианте со двоянными колесами. Следствием равномерного распределения нагрузки является значительно меньший уровень превышения твердости контрольных значений при сдваивании колес.

Информативным является отображение превышений твердости почвы по сравнению с контролем в двух испытанных вариантах (рис. 2)

Обычные колеса приводят к увеличению твердости почвы в колее и во внешней зоне колеи на 140–150 % на глубине 0–5 см. При увеличении глубины это превышение уменьшается, но при этом принимает весьма высокие значения до 20–30 % даже на полуметровой глубине. В зоне, которая визуально не подвержена влиянию ходовой трактора, превышение также отмечено, но до глубины 50 см это превышение возрастает до уровня 10–15 %. Таким образом, почвенное тело совершенно иначе себя ведет в различных зонах воздействия колес сельскохозяйственной техники на обычных колесах.

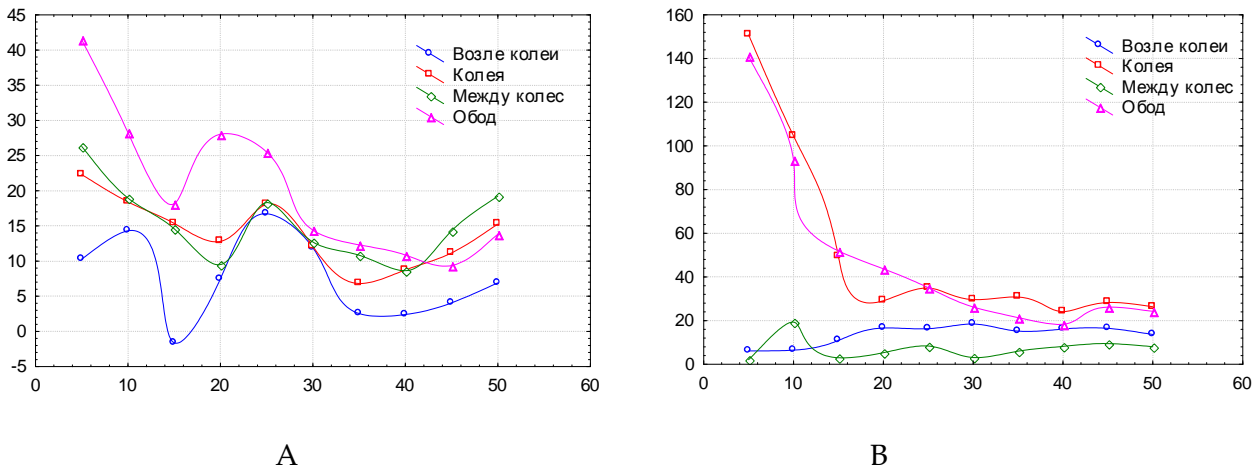


Рис. 2. Профильное распределение превышений твердости почвы (в %) относительно контрольного значения в пределах данного слоя для обычных (А) и сдвоенных колес (В).

Условные обозначения: ось абсцисс – глубина почвенного слоя, см; ось ординат – превышение показателей твердости в сравнении с контролем, %

Превышения твердости почвы по профилю при сдвоенных колесах имеют колебательную форму: зоны с относительно большим превышением чередуются с зонами с относительно меньшим превышением. Подобная динамика характерна для всех изученных зон влияния колес.

Полученные результаты можно интерпретировать с точки зрения перспектив релаксации почвы после сдавливания ходовой сельскохозяйственной техники.

В ситуации с обычными колесами происходит разрушение однородности почвенного тела, в результате чего мы наблюдаем принципиально различную динамику изменения твердости почвы по профилю в различных зонах воздействия.

В варианте со сдвоенными колесами почва в различных зонах воздействия ведет себя однотипно как следствие сохранения целостности почвенного тела. Очевидно, что релаксация почвы и восстановление показателей твердости при влиянии сдвоенных колес произойдет гораздо быстрее, чем в варианте воздействия обычными колесами.

Анализ геостатистических показателей пространственного варьирования твердости почвы представлен в таблицах 1.

Таблица 1. Постериорные байесовские оценки геостатистик варьирования твердости почвы

Слой почвы, см	Тренд (R^2)	κ	β			ϕ			σ^2			τ^2		
			Квантиль, %			Квантиль, %			Квантиль, %			Квантиль, %		
			50	2,5	97,5	50	2,5	97,5	50	2,5	97,5	50	2,5	97,5
<i>Воздействие колес без сдвигания</i>														
0–5	0.29	3.76	1.6	1.3		0.1	0.1		0.5	0.3		0.0	0.0	
			0	6	1.85	3	0	0.15	3	9	0.82	3	1	0.25
5–10	0.29	3.85	2.2	2.0		0.1	0.0		0.6	0.4		0.0	0.0	
			2	2	2.45	1	1	0.14	7	8	0.93	3	1	0.27
10–15	0.18	3.61	3.5	3.3		0.0	0.0		1.2	0.9		0.0	0.0	
			9	8	3.79	3	1	0.11	5	2	1.73	3	1	0.27
15–20	0.31	3.47	5.0	4.8		0.0	0.0		1.1	0.8		0.0	0.0	
			2	2	5.21	2	1	0.10	9	8	1.55	4	1	0.25
20–25	0.33	3.23	5.4	5.2		0.0	0.0		1.1	0.8		0.0	0.0	
			5	7	5.63	2	1	0.10	7	9	1.61	3	1	0.27
25–30	0.31	3.19	6.1	5.8		0.0	0.0		1.3	1.0		0.0	0.0	
			0	7	6.39	4	1	0.12	8	2	1.89	4	1	0.27
30–35	0.34	3.64	6.7	6.5		0.0	0.0		1.2	0.9		0.0	0.0	
			0	2	7.00	3	1	0.11	9	4	1.69	4	1	0.29
35–40	0.38	3.35	7.4	7.1		0.0	0.0		1.1	0.8		0.0	0.0	
			2	8	7.65	3	1	0.11	4	8	1.52	3	1	0.28
40–45	0.35	3.75	8.1	7.8		0.0	0.0		1.5	1.1		0.0	0.0	
			6	9	8.40	7	1	0.12	8	4	2.17	4	1	0.30
45–50	0.33	3.96	8.9	8.7		0.0	0.0		1.7	1.3		0.0	0.0	
			8	3	9.21	2	1	0.07	5	4	2.37	3	1	0.25
<i>Воздействие сдвоенных колес</i>														
0–5	0.17	3.61	1.4	1.3		0.0	0.0		0.1	0.0		0.0	0.0	
			4	7	1.50	9	1	0.13	0	7	0.13	6	2	0.29
5–10	0.13	3.76	2.0	1.9		0.0	0.0		0.2	0.2		0.0	0.0	
			7	6	2.18	2	1	0.07	9	2	0.39	6	2	0.29
10–15	0.19	3.75	3.2	3.0		0.0	0.0		0.6	0.4		0.0	0.0	
			3	6	3.40	2	1	0.09	0	0	0.78	4	2	0.28
15–20	0.11	3.12	3.9	3.7		0.0	0.0		0.9	0.7		0.0	0.0	
			3	7	4.11	2	1	0.09	1	1	1.19	6	2	0.28
20–25	0.15	3.32	4.5	4.3		0.0	0.0		0.9	0.6		0.0	0.0	
			1	2	4.74	3	1	0.11	0	6	1.18	8	2	0.26
25–30	0.17	3.02	5.2	5.0		0.0	0.0		0.9	0.7		0.0	0.0	
			0	1	5.42	2	1	0.10	4	0	1.26	6	2	0.28
30–35	0.11	3.00	5.8	5.7		0.0	0.0		1.0	0.7		0.0	0.0	
			8	3	6.07	2	1	0.08	6	5	1.37	6	2	0.27
35–40	0.14	2.87	6.5	6.3		0.0	0.0		1.0	0.7		0.0	0.0	
			9	8	6.79	3	1	0.10	3	3	1.36	7	2	0.28
40–45	0.29	3.15	6.6	6.4		0.0	0.0		0.9	0.7		0.0	0.0	
			8	5	6.86	4	1	0.12	6	1	1.29	6	2	0.28
45–50	0.41	2.92	6.6	6.3		0.0	0.0		1.0	0.7		0.0	0.0	
			2	6	6.80	4	1	0.11	9	9	1.53	6	2	0.30



Уровень пространственного тренда в варианте с обычными колесами значительно выше (0,18–0,38, медиана – 0,33), чем в случае со сдвоенными колесами (0,11–0,41, медиана – 0,14). Пространственный тренд возникает как результат глобального внешнего воздействия, которым в нашем случае является воздействие колес сельскохозяйственной техники. Очевидно, что влияние обычных колес на пространственное варьирование твердости почвы имеет более масштабное значение, чем сдвоенные колеса.

Параметр сглаживания вариограммы Маттерна принимает подобные значения в двух вариантах воздействия, что свидетельствует о сравнимости между собой других геостатистик. Радиус влияния, особенно в верхних почвенных слоях, в варианте с обычными колесами значительно выше, чем в варианте со сдвоенными колесами. Это свидетельствует о существенном распространении трансформирующего воздействия колес за пределы видимых границ колеи. Соответственно, для сдвоенных колес это распространение гораздо меньше. Низкий уровень отношения нагетт-вариации к частичному порогу говорит в большей степени о высокой степени пространственной компоненты изменчивости показателей твердости, которая, прежде всего, обусловлена упругостью почвенного тела при влажности, когда проводились испытания. Упругость почвы способствует передаче воздействия между соседними участками, что и находит свое выражение в наличии паттернов пространственного варьирования показателей твердости почвы.

Оценка геостатистических показателей необходимо для дифференциации пространственно определенной динамики изучаемых признаков от случайной вариабельности признаков в пространстве. Полученные результаты свидетельствуют о том, что установленная динамика твердости почвы инициирована воздействием колес сельскохозяйственной техники.

На рис. 3 и 4 представлены паттерны варьирования твердости почвы по слоям при воздействии обычных и спаренных колес.

На глубине 0–5 см от поверхности почвы четко прослеживается след обычных колес по показателям твердости почвы. На глубине 5–10 см след расширяется, захватывая области, которые находятся за границами горизонтальной проекции колеи колес. На глубине 10–15 см происходит нарушение четкости следа из-за распадаения его на локалитеты с высокой и низкой твердостью. На рис. 3 это явление отражено как увеличение вариабельности твердости почвы на соответствующей глубине. Зоны с низкой твердостью возникают как результат растрескивания почвы, которое происходит при крошении почвы под воздействием колес техники. В такой ситуации зоны сверхвысокой твердости почвы (почвенные глыбы) сочетаются с зонами низкой твердости (полости между глыб). При дальнейшем увеличении глубины четкость следа восстанавливается, но на глубине 45–50 см след существенно превышает границы горизонтальной проекции колеи колес.

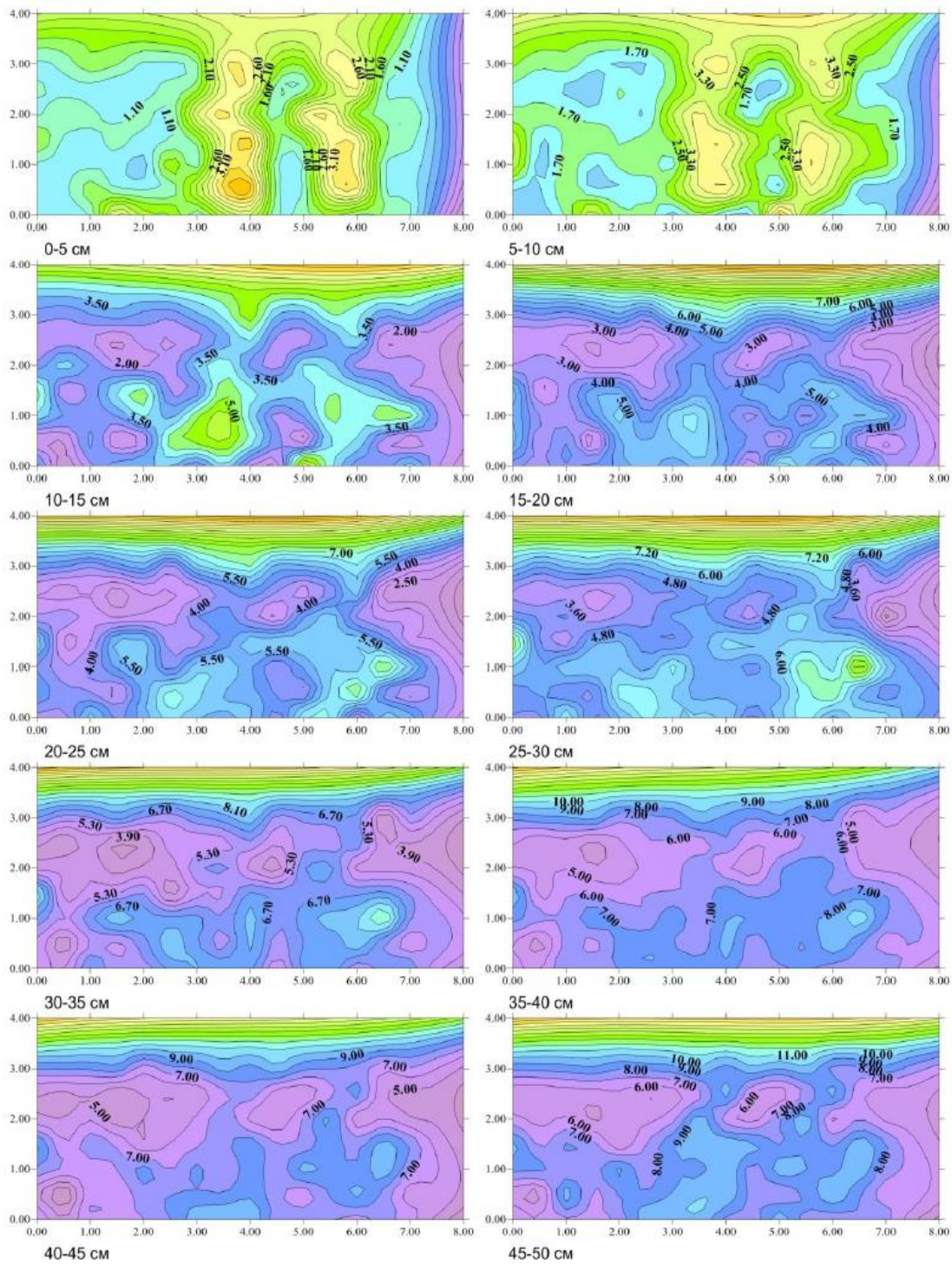


Рис. 3. Пространственное варьирование твердости почвы под воздействием техники с обычными колесами

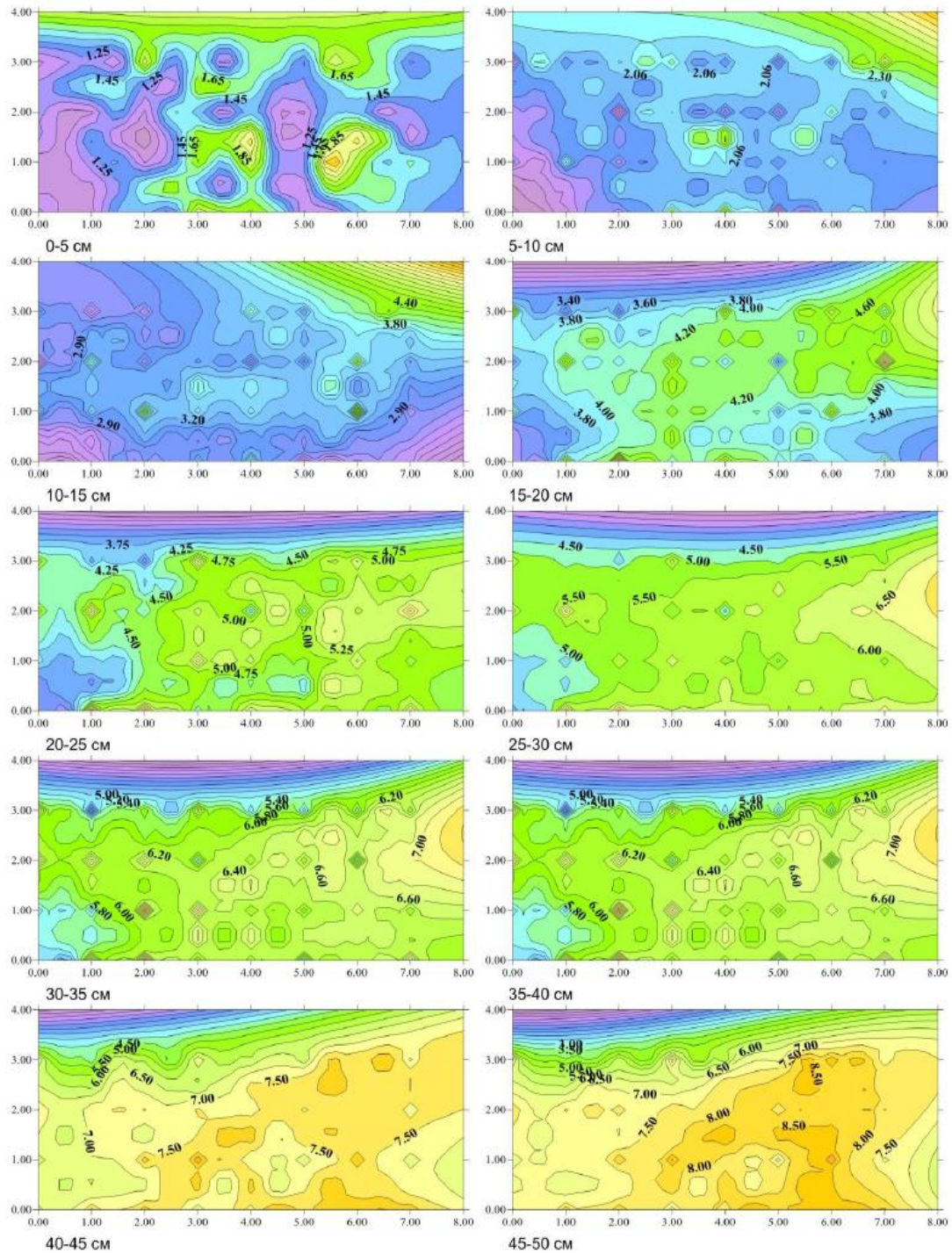


Рис. 4. Пространственное варьирование твердости почвы под воздействием техники со сдвоенными колесами

Таким образом, при воздействии обычных колес на почвы происходит существенное увеличение твердости почвы как непосредственно в колее, так и окружающем пространстве. Трансформация показателей твердости проявляется на глубине, превышающей 50 см. На рис. 4 показаны паттерны пространственной изменчивости твердости почвы в варианте со сдвоенными колесами. На глубине 0–5 см четко виден след от техники, который отражается в показателях твердости. Следует ещё раз отметить, что этот след имеет значительно меньшую амплитуду, чем в варианте с обычными колесами. Уже на глубине 5–10 см след теряет четкость своих очертаний и практически исчезает на больших глубинах. Наблюдаемый тренд изменчивости твердости в данном варианте, наиболее вероятно, обусловлен следом от обычной колесной техники, который остался от прежних проходов техники по полю и случайным образом попал в пределы экспериментального полигона.

На рис. 5 и 6 представлены объемные диаграммы варьирования твердости под воздействием двух испытуемых типов колес. Границы параллелепипеда указывают зону проведения измерений твердости. Кривая поверхность соответствует изолинии 3 МПа. Это значение твердости является критичным для роста корневых систем культурных растений. Также, варьирование твердости способно корректировать направление преимущественных потоков влаги в почве. Контрастное сочетание показателей твердости может быть отображением формирования в почве водоупора даже при том, что почвенное тело составлено гранулометрически однородной твердой фазой.

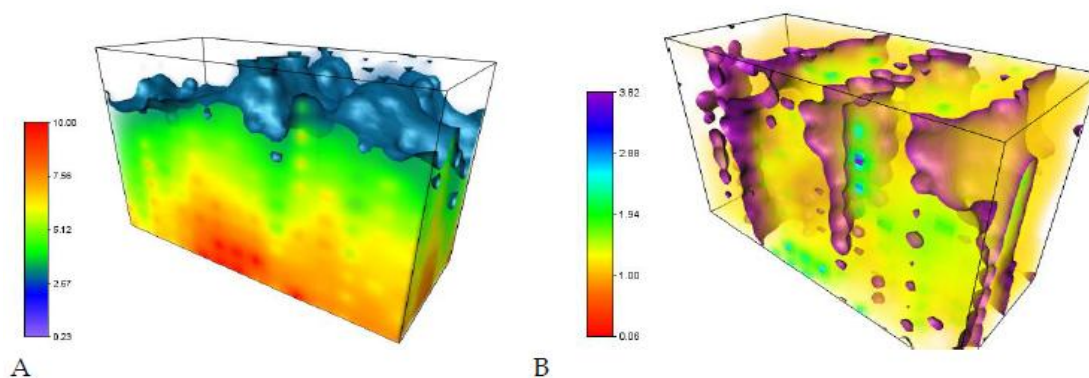


Рис. 5. Трехмерная диаграмма варьирования твердости почвы в условиях воздействия техники с обычными колесами.

Условные обозначения: А – твердость почвы (поверхность соответствует изолинии 3 МПа, шкала – в МПа); В – дифференциальная твердость, или остаток регрессионной модели второго порядка твердости от вертикальной координаты (поверхность соответствует нулевому отклонению, шкала – превышение предсказанных значений твердости по высоте почвенного столба, в МПа).



В контроле, уровень начала твердости варьирует на глубине 15–20 см, тогда как воздействие обычных колес приводит к резкому поднятию этого уровня к самой поверхности почвы (рис. 5, А). Трехмерные диаграммы вскрывают геометрию следа колес, который отражается в почвенном теле по показателям твердости. От поверхности зона техногенной трансформации почвенного тела конусообразно расширяется, при этом с увеличением глубины основание конуса существенно увеличивается.

Очевидным становится то, что зона влияния обычных колес значительно больше по протяженности в горизонтальном направлении, чем непосредственно след от колеи на поверхности. Как было отмечено, с увеличением глубины твердость увеличивается. Для различения естественной профильной изменчивости твердости от индуцированной техникой, был проведен регрессионный анализ изменчивости твердости в зависимости от глубины почвенного горизонта (полином второй степени, $R^2 = 0,66$). Остаток этой модели указывает на отличие наблюдаемого значения твердости от того, которое можно предполагать исходя из естественной профильной изменчивости признака. Этот остаток можно обозначить как дифференциальную твердость. Трехмерное отображение дифференциальной твердости четко показывает, что следы от двух колес сливаются на глубине 20–30 см. Кроме того, можно представить, что след составлен совокупностью конусов таким образом, что в поперечном направлении от колеи превышение границ воздействия на твердость почвы бывает более на 0,5–2 м.

Трехмерное отображение изменения твердости вследствие давления сдвоенных колес показало минимальный уровень трансформирующего влияния (рис. 6, А). Существенного поднятия критического уровня 3 МПа к поверхности почвы не произошло. Следует отметить наличие области повышенной твердости, которая не может быть ассоциированной с результатами давления колес трактора в эксперименте и является, наиболее вероятно, результатом действия техники в предыдущие периоды, вполне возможно, которые произошли в отдаленный период времени от момента испытаний.

Трехмерное представление варьирования дифференциальной твердости является более информативным для выявления характера воздействия сдвоенных колес на почву (рис. 6, В). Полином второй степени, в котором в качестве предиктора твердости выступает вертикальная координата (аппликата) характеризуется $R^2 = 0,80$. Это свидетельствует о том, что 80 % изменчивости твердости почвы при воздействии сдвоенными колесами в пределах изученного полигона, определяется естественной профильной динамикой, тогда как при воздействии обычных колес этот показатель составляет всего 66 %.

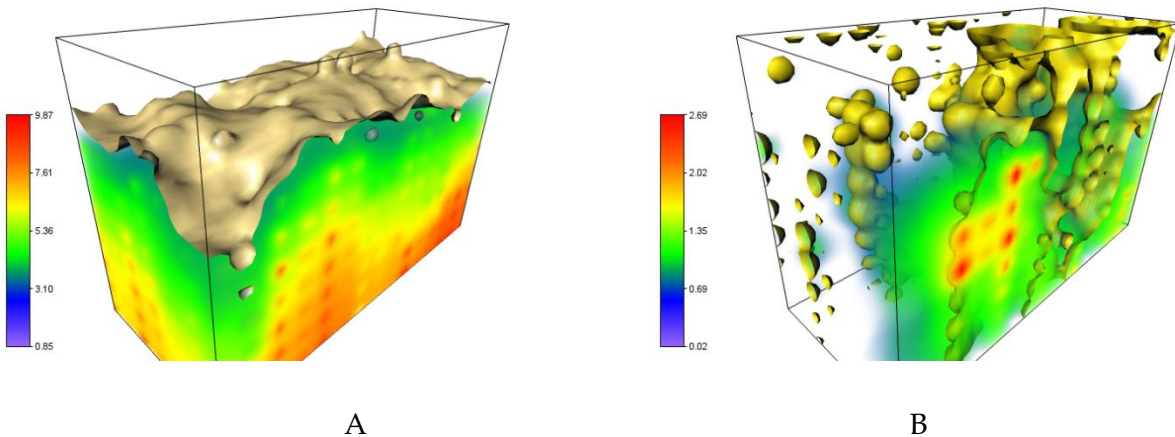


Рис. 6. Трехмерная диаграмма варьирования твердости почвы в условиях воздействия техники со сдвоенными колесами. Поверхность соответствует изолинии 3 МПа. Шкала – в МПа.

Условные обозначения: А – твердость почвы (поверхность соответствует изолинии 3 МПа, шкала – в МПа); В – дифференциальная твердость, или остаток регрессионной модели второго порядка твердости от вертикальной координаты (поверхность соответствует нулевому отклонению, шкала – превышение предсказанных значений твердости по высоте почвенного столба, в МПа).

Дифференциальная твердость позволяет выявить след в почвенной толще от сдвоенных колес не на всем протяжении колеи. Следы отчетливо видны только вблизи к фронтальной плоскости (на рисунке). Следует отметить, что именно в этой области отмечено локальное повышение твердости, которое нельзя связать с колеей экспериментального трактора. Такая конфигурация позволяет сделать предположение о наличии кумулятивного эффекта действия колеи трактора. Следы от прежних воздействий колес сохраняются долгий период времени, и при пересечении новой и старых колей негативное воздействие увеличивается. В нашем случае, следа сдвоенных колес в толще почвы практически нет, но он отчетлив в зоне остаточной повышенной твердости.

ВЫВОДЫ

1. Обычные колеса машинно-тракторных агрегатов осуществляют значительное воздействие на почву, которое превышает по своим размерам видимые границы колеи колес. Это воздействие проявляется в увеличении твердости почвы на 100–155 % в сравнении с контролем на глубине 0–10 см и на 20–30 % на глубине 45–50 %. Нельзя исключить того, что влияние колес продолжается глубже, чем были проведены испытания.



2. Критическое для культурных растений значение твердости почвы в 3 МПа под воздействием обычных колес сельскохозяйственной техники приближается практически к поверхности. Характер профильных изменений твердости в различных зонах воздействия колес позволяет предположить длительный период релаксации почвы для достижения фоновых значений твердости. Для установления конкретных показателей динамики необходимы дальнейшие исследования.

3. Негативное влияние переуплотнения не ограничивается только ухудшением условий роста корневых систем растений. Возможно нарушение процессов перемещения влаги в почве, ускоренное испарение и замедленные процессы фильтрации и инфильтрации, разрушение агрегатной структуры, активизация эрозионных процессов. Понимание этих процессов даст возможность объемного понимания реального воздействия ходовых систем машинно-тракторных аппаратов на почву.

4. Зона интенсивного воздействия сдвоенных колес ограничена верхними почвенными слоями (0–15 см). Важнейшей особенностью воздействия сдвоенных колес является отсутствие переуплотнения выше критических уровней. Нельзя исключать возможного позитивного воздействия умеренного уплотнения почвы под воздействием сдвоенных колес для роста сельскохозяйственных культур и сохранения влаги в почве.

5. Вероятным является кумулятивный негативный эффект на почву пересекающихся колес транспортных средств. Длительный период релаксации почвы после антропогенной трансформации может создавать сеть следов транспортных средств на поле. В зоне пересечения следов негативные эффекты значительно увеличиваются.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Жуков А. В. Пространственная изменчивость твердости педоземов / А. В. Жуков, Г. А. Задорожная // Біологічний вісник МДПУ ім. Б. Хмельницького – 2013. – № 1(7). – С. 34–49.
- Жуков А. В. Байесовский подход для оценки гетерогенизации пространственного распределения почвенных свойств / А. В. Жуков, Е. В. Андруевич, А. Ю. Покуса, Е. В. Лапко // Acta Biologica Sibirica. – 2015. – № 3–4. – С. 76–91.
- Жуков А. В. Оценка пространственной зависимости морфометрических характеристик кукурузы (*Zea mays* L.) от эдафических свойств / А. В. Жуков, К. В. Андруевич // Acta Biologica Sibirica. – 2015. – № 3–4. – С. 24–41.
- Жуков А. В., Кунах О. Н. Твердость дерново-литогенных почв на лессовидных суглинках // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2011, № 1. – С. 63–69.

- Жуков А.В. Пространственная изменчивость твердости педоземов / А. В. Жуков, Г. А. Задорожная, А. А. Демидов // *Агрохімія та ґрунтознавство*. – 2014, вип. 81. – 28–34.
- Кунах О. Н. Экологический аспект твердости почвы в пристенной дубраве / О. Н. Кунах, А. А. Балдин // *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія*. – 2011. – Вип. 19, т. 1. – С. 65–74.
- Кунах О. Н., Задорожна Г. А., Жуков А. В. ГИС-технологии и 3D-описание твердости почвы при рекультивации земель // III-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю. Збірник наукових статей. Том. 1. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – С. 184–187.
- Лозовіцький П. С. Порівняння властивостей темно-каштанового солонцюватого ґрунту заповідника “Асканія-Нова” та оброблюваних агроценозів / П. С. Лозовіцький // *Заповідна справа в Україні*. – 2009. – т.15, вип.2. – С.106-114.
- Медведев В. В. Твердость и твердограммы в исследованиях по обработке почв [Текст] / В. В. Медведев. // *Почвоведение*. – 2009. – № 3. – С. 325–327.
- Медведев В. В. Твердость почвы / В. В. Медведев / Харьков. – Изд. КП «Городская типография». – 2009. – 152 с.
- Медведев В. В. Временная и пространственная гетерогенизация распахиваемых почв / В. В. Медведев // *ґрунтознавство*. – 2013. – Т. 14, № 1-2. – С. 5–22.
- Abramowitz M. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables / M. Abramowitz, I.E. Stegun (Eds.). – 1972. – 10th Printing. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington DC. – 1044 p.
- Ageikin I. S. Off-the-Road Wheeled and Combined Traction Devices: Theory and Calculation / I. S. Ageikin. New Delhi, India: Amerind Publishing Co. – 1987. – 202 p.
- Alakukku L. Review: Subsoil compaction due to wheel traffic / L. Alakukku // *Agric. and Food Sci. in Finland*. – 1999. – Vol. 8(4-5). – P. 333–351.
- Antille D.L. Soil displacement and soil bulk density changes as affected by tire size / D.L. Antille, D. Ansorge, M.L. Dresser, R.J. Godwin // *Transactions of the ASABE*. – 2013. – Vol. 56(5). – P. 1683–1693.
- Camp Jr. C. R. Effect of mechanical impedance on cotton root growth / Jr. C. R. Camp, Z. F. Lund // *Trans. ASAE*. – 1968. – P. 189–190.
- Chamen W. C. T. The effect of tyre/soil contact pressure and zero traffic on soil and crop responses when growing winter wheat / W. C. T. Chamen, E. T. Chithey, P. R. Leede, M. J. Goss, K. R. Howse // *J. Agric. Eng. Res.* – 1990. – Vol. 47. – P. 1–21.
- Chamen W. C. T. Assessment of a wide-span vehicle (gantry), and soil and cereal crop responses to its use in a zero-traffic regime / W. C. T. Chamen, C. W. Watts, P. R. Leede, D. J. Longstaff // *Soil and Tillage Res.* – 1992. – Vol.24(4). – P. 359–380.
- Chamen, W. C. T. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 2: Equipment and field practices / W. C. T. Chamen, L. Alakukku, S.



- Pires, C. Sommer, G. Spoor, F. Tijink, P. Weisskopf // *Soil and Tillage Res.* – 2003. – Vol. 73(1-2). – P. 161–174.
- Dain-Owens A. P. The risk of harm to archaeological artefacts in soil from dynamic subsurface pressures generated by agricultural operations: Experimental studies / A. P. Dain-Owens, M. Kibblewhite, M. J. Hann, R. J. Godwin // *Archaeometry.* – 2012. – doi:10.1111/j.1475-4754.2012.00720.x.
- Dawidowski, J. B. Laboratory simulation of the effects of traffic during seedbed preparation on soil physical properties using quick uni-axial compression test / J. B. Dawidowski, P. Lerink // *Soil and Tillage Res.* – 1990. – Vol. 17(1-2). – P. 31–45.
- de Wijs H.J. Statistics of ore distribution: Part I. Frequency distribution of assay values / H.J. de Wijs // *Journal of the Royal Netherlands Geological and Mining Society, New Series.* – 1951. – Vol. 13. – P. 365– 375.
- de Wijs H.J. Statistics of ore distribution: Part II. Theory of binomial distribution applied to sampling and engineering problems / H.J. de Wijs // *Journal of the Royal Netherlands Geological and Mining Society, New Series.* – 1953. – Vol. 15. – P. 12–24.
- Diggle P. J. Bayesian inference in Gaussian model-based geostatistics / P. J. Diggle, P. J. Ribeiro // *Geographical and Environmental Modelling.* – Vol. 6, No. 2. – 2002. – P. 129–146.
- Håkansson I. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction / I. Håkansson, J. Lipiec // *Soil and Tillage Res.* – 2000. – Vol. 53(2). – P. 71–85.
- Håkansson I. Soil compaction / I. Håkansson, W. B. Voorhees. – *Methods for Assessment of Soil Degradation.* R. Lal, W. H. Blum, C. Valentine, and B. A. Stewart, eds. Boca Raton: CRC Press.– 1998. – P. 167-179.
- Håkansson I. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes / I. Håkansson, W. B. Voorhees, H. Riley // *Soil and Tillage Res.* – 1988. – Vol.11(3-4). – P. 239–282.
- Handcock M.S. A Bayesian analysis of kriging / M.S. Handcock, M.L. Stein // *Technometrics.* – 1993. – Vol. 35. – P. 403–410.
- Horn R. Soil compactability and compressibility / R. Horn, M. Lebert // *Soil Compaction in Crop Production.* – Soane and C. van Ouwerkerk, eds. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. – 1994. – P. 45–70.
- Koolen A. J. *Agricultural Soil Mechanics* / A. J. Koolen, H. Kuipers // *Advanced Series in Agricultural Sciences.* Berlin, Germany: Springer-Verlag. – 1983. – Vol. 13. – 240 p.
- Kutzbach H. D. Trends in power and machinery / H. D. Kutzbach // *J. Agric. Eng. Res.* – 2000. – Vol. 76(3). – P. 237–247.
- Lamandé M. Transmission of vertical stress in a real soil profile: Part III. Effect of soil water content / M. Lamandé, P. Schjønning // *Soil and Tillage Res.* – 2011. – Vol. 114(2). – P. 78–85.

- Lark R.M. Estimating variograms of soil properties by the method-of-moments and maximum likelihood / R.M. Lark // *European Journal of Soil Science*. – 2000. – Vol. 51. – P. 717–728.
- Lophaven S. Methods for estimating the semivariogram / S. Lophaven, J. Carstensen, H. Rootzen // *Symposium i Anvendt Statistik, Institut for Informationsbehandling, Handelshojskolen i Aarhus*. – 2002. – P. 128–144.
- Matern B. Spatial variation / B. Matern // *Lecture Notes in Statistics*. – 1986. – No. 36, Springer, New York. – 150 p.
- McBratney A.B. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture / A.B. McBratney, M.J. Pringle // *Precision Agriculture*. – 1999. – Vol. 1. – P. 125–152.
- McCullagh P Evidence for conformal invariance of crop yields / P. McCullagh, D. Clifford // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*. 2006. – 462. – P. 2119–2143.
- Minasny B. The Matern function as a general model for soil variograms / B. Minasny, A. B. McBratney // *Geoderma*. – 2005. – Vol. 128. – P. 192–207.
- Mosaddeghi M. R. Suitability of pre-compression stress as the real critical stress of unsaturated agricultural soils / M. R. Mosaddeghi, A. J. Koolen, M. A. Hajabbasi, A. Hemmat, T. Keller // *Biosystems Eng.* – 2007. – Vol. 98(1). – P. 90–101.
- Plackett C. W. The ground pressure of some agricultural tyres at low load and with zero sinkage / C. W. Plackett // *J. Agric. Eng. Res.* – 1984. – Vol. 29(2). – P. 159–166.
- Raper R. L. Agricultural traffic impacts on soil / R. L. Raper // *J. Terramech.* – 2005. – Vol. 42(3-4). – P. 259–280.
- Salire E. V. Compression of intact subsoils under short-duration loading / E. V. Salire, J. E. Hammel, J. H. Hardcastle // *Soil and Tillage Res.* – 1994. – Vol. 31(2-3). – P. 235–248.
- Spoor G. Overcoming compaction / G. Spoor, R. J. Godwin // *Soil and Water*. – 1981. – Vol. 9(1). – P. 11–13.
- Spoor G. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines / G. Spoor, R. J. Godwin // *J. Agric. Eng. Res.* – 1978. – Vol. 23(3). – P. 243–258.
- Stein M.L. Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging / M.L. Stein. – New York: Springer. – 1999. – 247 p.
- Taylor H. M. Penetration of cotton seedling taproot as influenced by bulk density, moisture content, and strength of the soil / H.M. Taylor, H.R Gardner // *Soil Science*. – 1963. – Vol. 96. – P. 153–156.
- Taylor H. M. Influence of soil strength on the root-growth habits of plants / H. M. Taylor, E. Burnett // *Soil Science*. – 1964. – Vol. 98. – P. 174–180.
- Tullberg J. N. Controlled traffic farming: From research to adoption in Australia / J. N. Tullberg, D. F. Yule, D. McGarry // *Soil and Tillage Res.* – 2007. – Vol. 97(2). – P. 272–281.



- Webster R. Geostatistics for Environmental Scientists / R. Webster, M.A. Oliver. Chichester. – John Wiley & Sons. – 2001. – 271 p.
- Whittle P. On stationary processes in the plane / P. Whittle // *Biometrika*. – 1954. – Vol.41. – P. 434– 449.
- Zimmerman D.L. A comparison of spatial semivariogram estimators and corresponding ordinary kriging predictors / D.L. Zimmerman, M.B. Zimmerman // *Technometrics*. – 1991. – Vol. 33. – P. 77–91.

REFERENCES

- Abramowitz, M., Stegun, I.E. (1972). Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington DC.
- Ageikin, I. S. (1987). Off-the-Road Wheeled and Combined Traction Devices: Theory and Calculation. New Delhi, India: Amerind Publishing Co.
- Alakukku, L. (1999). Review: Subsoil compaction due to wheel traffic. *Agric. and Food Sci. in Finland*. 8(4-5), 333–351.
- Antille, D.L., Ansorge, D., Dresser, M.L., Godwin, R.J. (2013). Soil displacement and soil bulk density changes as affected by tire size. *Transactions of the ASABE*. 56(5), 1683–1693.
- Camp, Jr. C. R., Lind, Z.F. (1968). Effect of mechanical impedance on cotton root growth. *Transactions of the ASAE*, 189–190.
- Chamen, W. C. T., Alakuku, L., Pires, S., Sommer, S., Spoor, G., Tijnk, F., Weiskopf, P. (2003). Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review. Part 2: Equipment and field practices. *Soil and Tillage Res.* 73 (1-2), 161–174.

- Chamen, W. C. T., Chithey, E.T., Leede, P.R., Goss, M.J., Howse, K.R. (1990). The effect of tyre/soil contact pressure and zero traffic on soil and crop responses when growing winter wheat. *Agric. Eng. Res.* 47, 1–21.
- Chamen, W. C. T., Watts, C.W., Leede, P.R., Lonstaff, D.J. (1992). Assessment of a wide-span vehicle (gantry), and soil and cereal crop responses to its use in a zero-traffic regime. *Soil and Tillage Res.* 24 (4), 359–380.
- Dain-Owens, A. P., Kibblewhite, M., Hann, M.J., Godwin, R.J. (2012). The risk of harm to archaeological artefacts in soil from dynamic subsurface pressures generated by agricultural operations: Experimental studies. *Archaeometry*. doi:10.1111/j.1475-4754.2012.00720.x.
- Dawidowski, J. B., Lernik, P. (1990). Laboratory simulation of the effects of traffic during seedbed preparation on soil physical properties using quick uni-axial compression test. *Soil and Tillage Res.* 17(1-2), 31–45.
- de Wijs, H.J. (1951). Statistics of ore distribution: Part I. Frequency distribution of assay values. *Journal of the Royal Netherlands Geological and Mining Society, New Series.* 13, 365– 375.
- de Wijs, H.J. (1953). Statistics of ore distribution: Part II. Theory of binomial distribution applied to sampling and engineering problems. *Journal of the Royal Netherlands Geological and Mining Society, New Series.* 15, 12– 24.
- Diggle, P. J., Ribeiro, P.J. (2002). Bayesian inference in Gaussian model-based geostatistics. *Geographical and Environmental Modelling.* 6 (2), 129–146.



- Håkansson, I. A., Lipiec, J. (2000). Review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Res.* 53(2), 71–85.
- Håkansson, I., Voorhees, W.B., Riley, H. (1988). Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil and Tillage Res.* 11(3-4), 239–282.
- Håkansson, I., Voorhees, W.B. (1998). Soil compaction. In: *Methods for Assessment of Soil Degradation*. R. Lal, W. H. Blum, C. Valentine, and B. A. Stewart (Eds.). Boca Raton: CRC Press.
- Handcock, M.S., Stein, M.L. (1993). A Bayesian analysis of kriging. *Technometrics.* 35, 403–410.
- Horn, R., Lebert, M. (1994). Soil compactability and compressibility . In: *Soil Compaction in Crop Production*. Soane and C. van Ouwerkerk (Eds.). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Koolen, A. J., Kuipers, H. (1983). *Agricultural Soil Mechanics*. Advanced Series in Agricultural Sciences. Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- Kunakh, O. N., Baldin, A.A. (2011). Ekologicheskiy aspekt tverdosti pochvy v pristennoy dubrave. *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Biologiya. Ekologiya.* 19 (1), 65–74.
- Kunakh, O. N., Zadorozhna, G. A., Zhukov, A. V. (2011). GIS-tekhnologii i 3D-opisanie tverdosti pochvy pri rekul'tivatsii zemel'. III Vseuraïns'kiy z'ïzd

- ekologiv z mizhnarodnoyu uchastyu. Zbirnik naukovich statey. Vinnitsya: VNTU.
- Kutzbach, H. D. (2000). Trends in power and machinery. *J. Agric. Eng. Res.* Vol. 76(3), 237–247.
- Lamandé, M., Schjønning, P. (2011). Transmission of vertical stress in a real soil profile: Part III. Effect of soil water content. *Soil and Tillage Res.* 114(2), 78–85.
- Lark, R.M. (2000). Estimating variograms of soil properties by the method-of-moments and maximum likelihood. *European Journal of Soil Science.* 51, 717–728.
- Lophaven, S., Carstensen, J., Rootzen, H. (2002). Methods for estimating the semivariogram. *Symposium i Anvendt Statistik, Institut for Informationsbehandling, Handelshojskolen i Aarhus.*
- Lozovits'kiy, P. S. (2009). Porivnyannya vlastivostey temno-kashtanovogo solontsyuvatogo gruntu zapovidnika “Askaniya-Nova” ta obroblyuvanikh agrotsenoziv. *Zapovidna sprava v Ukraïni.* 15 (2), 106-114.
- Matern, B. (1986). *Spatial variation. Lecture Notes in Statistics.* Springer, New York.
- McBratney, A.B., Pringle, M.J. (1999). Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. *Precision Agriculture.* 1, 125– 152.



- McCullagh, P., Clifford, D. (2006). Evidence for conformal invariance of crop yields. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*. 462, 2119–2143.
- Medvedev, V. V. (2009). Tverdost' i tverdogrammy v issledovaniyakh po obrabotke pochv. *Pochvovedenie*. 3, 325–327.
- Medvedev, V. V. (2009). Tverdost' pochvy. Khar'kov. Gorodskaya tipografiya.
- Medvedev, V. V. (2013). Vremennaya i prostranstvennaya geterogenizatsiya raspakhivaemykh pochv. *Gruntoznnavstvo*. 14 (1-2). 5–22.
- Minasny, B., McBratney, A.B. (2005). The Matern function as a general model for soil variogram. *Geoderma*. 128, 192– 207.
- Mosaddeghi, M. R., Koolen, A.J., Hajabbasi, M.A., Hemmat, A., Keller, T. (2007). Suitability of pre-compression stress as the real critical stress of unsaturated agricultural soils. *Biosystems Eng.* 98(1), 90–101.
- Plackett, C. W. (1984). The ground pressure of some agricultural tyres at low load and with zero sinkage. *J. Agric. Eng. Res.* 29(2), 159–166.
- Raper, R. L. (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *J. Terramech.* 42(3-4), 259–280.
- Salire, E. V., Hammel, J.E., Hardcastle, J.H. (1994). Compression of intact subsoils under short-duration loading. *Soil and Tillage Res.* 31(2-3), 235–248.
- Spoor, G., Godwin, R.J. (1978). An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tires. *J. Agric. Eng. Res.* 23(3), 243–258.

- Spoor, G., Godwin, R.J. (1981). Overcoming compaction. *Soil and Water*. 9(1), 11–13.
- Stein, M.L. (1999). *Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging*. New York: Springer.
- Taylor, H. M., Burnett, E. (1964). Influence of soil strength on the root-growth habits of plants. *Soil Science*. 98, 174–180.
- Taylor, H. M., Gardner, H.R. (1963). Penetration of cotton seedling taproot as influenced by bulk density, moisture content, and strength of the soil. *Soil Science*. 96, 153–156.
- Tullberg, J. N., Yule, D.F., McGarry, D. (2007). Controlled traffic farming: From research to adoption in Australia. *Soil and Tillage Res.* 97(2), 272–281.
- Webster, R., Oliver, M.A. (2001). *Geostatistics for Environmental Scientists*. Chichester. John Wiley & Sons.
- Whittle, P. (1954). On stationary processes in the plane. *Biometrika*. 41, 434–449.
- Zhukov, A. V., Andrusevich, K.V. (2015). Otsenka prostranstvennoy zavisimosti morfometricheskikh kharakteristik kukuruzy (*Zea mays* L.) ot edaficheskikh svoystv. *Acta Biologica Sibirica*. 1(3–4). 24–41.
- Zhukov, A. V., Andrusevich, K.V., Pokusa, A.Yu., Lapko, E.V. (2015). Bayesovskiy podkhod dlya otsenki geterogenizatsii prostranstvennogo raspredeleniya pochvennykh svoystv. *Acta Biologica Sibirica*. 1 (3–4), 76–91.



- Zhukov, A. V., Zadorozhnaya, G.A. (2013). Prostranstvennaya izmenchivost' tverdosti pedozemov. *Biologichniy visnik MDPU im. B. Khmel'nits'kogo*. 3(1), 34–49.
- Zhukov, A.V., Kunakh, O.N. (2011). Tverdost' dernovo-litogennykh pochv na lessovidnykh suglinkakh. *Visnik Dnipropetrovs'kogo derzhavnogo agrarnogo universitetu*. 1, 63–69.
- Zhukov, A.V., Zadorozhnaya, G.A., Demidov, A.A. (2014). Prostranstvennaya izmenchivost' tverdosti pedozemov. *Agrokimiya ta gruntoznavstvo*. 81, 28–34.
- Zimmerman, D.L., Zimmerman, M.B. (1991). A comparison of spatial semivariogram estimators and corresponding ordinary kriging predictors. *Technometrics*. 33, 77–91.

Поступила в редакцію 01.11.2015

Как цитировать:

Жуков, А. В. (2015). ГИС-подход для оценки влияния обычных и сдвоенных колес на твердость почвы. *Биологический вестник Мелитопольского государственного педагогического университета имени Богдана Хмельницкого*, 5 (3), 73-100.

crossref <http://dx.doi.org/10.7905/bbmbsp.v5i3.988>

© Жуков, 2015

Users are permitted to copy, use, distribute, transmit, and display the work publicly and to make and distribute derivative works, in any digital medium for any responsible purpose, subject to proper attribution of authorship.

