

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБЪЕМА И ДОСТУПНОСТИ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ СУХОЙ СТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

А. А. Бондарович¹, Е. В. Понькина¹, Г. Шмидт², П. Иллигер²

¹Алтайский государственный университет,
656049, Алтайский край, г. Барнаул, ул. Ленина, 61

E-mail: bondarovich@geo.asu.ru, ponkinaelena77@mail.ru;

²Институт наук о земле и географии, Университет Мартина Лютера Галле-Виттенберг,
06120, Галле, Фон-Зекендорфф-Платц, 4
E-mail: gerd.schmidt@geo.uni-halle.de

Поступила в редакцию 18 мая 2020 г., принята к печати 26 августа 2020 г.

В исследовании представлены результаты четырехлетнего полевого эксперимента по изучению двух технологий обработки пашни: нулевая технология (НТ) и технология глубокой обработки (ТГО). В ходе эксперимента выполнялись измерения объемной влажности почвы и капиллярно-сорбционного давления воды (pF), которое определяет степень доступности почвенной влаги для растений. Измерения осуществлялись на глубинах 30, 60 и 120 см за вегетационные периоды 2013–2016 гг. с интервалом 6 часов двумя автоматическими почвенно-гидрологическими станциями, установленными на смежных тестовых полях. Опытные делянки расположены на юге Западной Сибири в сухой Кулундинской степи (Михайловский район Алтайского края). На фоне «обеспеченного увлажнения» (ГТК Селянинова 0,9–1,2) в течение вегетационного периода были выявлены преимущества НТ над ТГО с точки зрения сохранения почвенной влаги. На глубине до 30 см при НТ наблюдалось меньшее снижение уровня объемной влаги в ходе вегетации по сравнению с ТГО. На глубинах 60 и 120 см при НТ отмечены более высокие показатели влажности почвы, которые можно рассматривать как потенциальный запас влаги для отдельных культур в период засухи. При системе НТ выявлен период снижения доступности почвенной влаги (август–сентябрь) на глубинах 30 и 60 см, в указанный период также зафиксирован переход через границу устойчивого завядания $pF > 4,2$.

Ключевые слова: нулевая технология, объемная влажность почвы, капиллярно-сорбционное давление воды, Кулундинская равнина, Западная Сибирь.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOIL MOISTURE AND WATER-HOLDING CAPACITY UNDER DIFFERENT TILLAGE TECHNOLOGIES IN CONDITIONS OF DRY STEPPE OF WESTERN SIBERIA

A. A. Bondarovich¹, E. V. Ponkina¹, G. Schmidt², P. Illiger²

¹Altai State University
61, Leninskiy pr., Barnaul, Altai Krai, 656049, Russia

E-mail: bondarovich@geo.asu.ru, ponkinaelena77@mail.ru;

²Institute of Geography and Geosciences, Martin Luther University Halle-Wittenberg
4, Fon-Zekendorf Sq., Halle, 06120, Germany
E-mail: gerd.schmidt@geo.uni-halle.de

The paper presents the results of a four-year field experiment where two tillage technologies were studied: no-tillage (NT) and deep tillage (DT). Soil moisture content and water-holding capacity (pF), which defines soil water availability for plants, were measured during the experiment. The measurements were carried out during the growing seasons of 2013–2016 at soil depths of 30, 60 and 120 cm with 6 hours intervals by two automatic soil hydrological stations installed on adjacent test fields. The experimental sites were located in the south of Western Siberia, in the dry Kulunda steppe (Mikhailovskiy district, Altai Krai). The advantages of NT over DT in terms of soil moisture conservation were revealed against the background of «well-moisten» growing season (Selyaninov Hydrothermal Coefficient were varied from 0.9 to 1.2). A smaller decrease in the level of volumetric soil moisture was observed at the soil depth of up to 30 cm during the growing season under NT. Higher soil moisture values were noted at soil depths of 60 and 120 cm under NT. These moisture reserves can be considered as a potential stock for crops in a case of droughts. A period of decrease in the availability of soil moisture (August–September) at the soil depths of 30 and 60 cm was revealed under the NT system. The transition through the wilting point ($P_f > 4.2$) was also recorded during this period.

Keywords: no-tillage, soil moisture content, capillary and sorption water pressure, Kulunda plain, Western Siberia.

ВВЕДЕНИЕ

Среди физических свойств, определяющих плодородие степных почв, ведущее место занимает водоудерживающая способность. В современной гидрофизике почв большое теоретическое и практическое значение имеет зависимость влажности почв от капиллярно-сорбционного потенциала воды или основной гидрофизической характеристики (ОГХ) (Глобус, 1987). Данная зависимость позволяет определять важнейшие гидрологические константы, широко используемые при математическом моделировании продукционных процессов в сельском хозяйстве (Mirschel и др., 2020).

С середины 2000-х годов активно исследуются и разрабатываются ресурсосберегающие технологии земледелия (англ. Conservation Tillage) (Kassam и др., 2019), направленные на сохранение и воспроизводство почвенного плодородия, накопление и оптимальное распределение почвенной влаги, а также обеспечение доступности почвенной влаги и питательных веществ для растений. Одним из основных принципов консервационных методов обработки пашни является минимизация механического воздействия на почву. Именно он положен в основу технологий минимальной обработки пашни – «Mini-Till». Практически полное исключение механического воздействия на почву предполагает нулевая технология – «No-Till», или «No-Tillage» (далее – НТ), при которой посев культуры производится непосредственно в стерню по предшественнику без механической обработки пашни (технология прямого посева) (Lal и др., 2007; Lindwall, Sonntag, 2010; Беляев и др., 2018). Вопросы адаптации ресурсосберегающих технологий, в частности нулевой технологии, к степной зоне в настоящее время рассматриваются во множестве научных исследований (Baig, Gamache, 2009; Корчагин, Новиков, 2009; Derpsch и др., 2010; Lafond и др., 2011; Дрёпа, Голубь, 2014; Слюсарев, Подколзин, 2017; Беляев и др., 2016, 2018), в которых не всегда однозначно оценивается влияние НТ на агрофизические свойства почвы и урожайность культур.

Настоящее исследование представляет собой сравнительный анализ результатов полевого эксперимента по изучению двух технологий обработки пашни (НТ и ТГО), проводимого в 2013–2016 гг. в условиях сухой степи Кулундинской равнины Западной Сибири. Целью работы являлось выявление преимуществ и/или недостатков НТ с точки зрения сохранения почвенной влаги и ее доступности для растений. В статье рассмотрены агроклиматические условия сельскохозяйственного производства, сложившиеся в сухой степи Кулундинской равнины в 2013–2016 гг., а также представлены результаты сравнительного анализа динамики температуры, влажности почвы и капиллярно-сорбционного потенциала почв по величине рF.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования

Для Кулундинской равнины в вегетационный период растений характерны большое количество

тепла (суммы активных температур — 2000–2600°C) и дефицит осадков (230–350 мм/год). В первую половину вегетационного периода (май-июнь) влага для растений особенно необходима, однако за указанное время выпадает только 50–70 мм осадков (Сляднев, 1965). Анализ климатических трендов, характерных для территории Западной Сибири, позволил выявить увеличение степени засушливости климата (Харламова, 2012). Почвы Западно-Кулундинской подпровинции каштановые и темно-каштановые, в Восточно-Кулундинской подпровинции переходят в южные малогумусные маломощные и среднемощные черноземы. Согласно геоботаническому районированию (Атлас..., 1978), исследуемая территория относится к Казахстанской степной провинции, где были распространены настоящие дерновинно-злаковые степи: типчаково-ковыльные, типчаково-тырсовые, типчаково-ковылково-красноковыльные. Растительный и почвенный покров Кулунды претерпел значительные изменения в 50-х гг. прошлого века в период «целинной кампании» (1954–1963 гг.), когда в результате антропогенной трансформации степных экосистем, а также под влиянием ветровой и водной эрозии произошла интенсивная деградация почв. Это привело к снижению стабильности почвенных агрегатов и водоудерживающей способности почв (Frühauф и др., 2020). В таких условиях научное обоснование и внедрение агротехнологий, способствующих сохранению почвенной влаги и обеспечивающих ее доступность для растений, являются весьма важными для развития региональной системы земледелия.

Стационар «Полуямки»

В 2013 г. в рамках междисциплинарного проекта Кулунда (KULUNDA Project, BMBF, 2011–2016 гг.) в сухой степи на территории Кулундинской равнины (Михайловский район Алтайского края) был создан стационар для почвенно-гидрологических и метеорологических наблюдений (Stephan и др., 2014). Стационар оборудован метеостанцией (с. Полуямки, E79°42,786' N52°03,959') и двумя почвенно-гидрологическими станциями (ПГС), которые установлены на опытных делянках (ПГС 1 – N52° 04,180' E79° 54,014'; ПГС 2 – N52° 04,128' E79° 54,006'). Делянки имеют размер 12×30 м, до 2013 г. на них проводилась глубокая обработка почвы (рыхление на глубину до 22–24 см). Почва тестового поля – южный чернозем суглинистый среднемощный малогумусный.

Метеорологическая станция измеряет следующие параметры: солнечная радиация, направление и скорость ветра (м с⁻¹), температура (°C) и влажность воздуха (%), атмосферное давление (пА), количество осадков (мм).

Почвенно-гидрологические станции измеряют объемную влажность (Vol. %), капиллярно-сорбционный потенциал (pF) и температуру почвы (°C) на глубинах 30, 60 и 120 см.

На экспериментальных делянках применялись следующие агротехнологии.

Делянка А. Технология глубокой обработки почвы (ТГО) с помощью агрегата ПГ-3-5 – «плоскореза-глубокорыхлителя» (рыхление до 22–24 см). Севооборот: 2013 г. – пшеница; 2014 г. – пар; 2015 г. – пшеница; 2016 г. – пшеница.

Делянка Б. Нулевая технология (НТ), или «No-Tillage», включала прямой посев (посевной комплекс «Condor 12001», производитель Amazone (Германия)). Севооборот: 2013 г. – пшеница; 2014 г. – рапс; 2015 г. – пшеница; 2016 г. – горох.

Классификация почв по водоудерживающей способности

Одним из основных понятий гидрологии почв является «вагоудерживающая способность почвы», которая, согласно А. А. Роде, обусловлена, с одной стороны, силами, возникающими при контакте «твердая фаза – влажность почвы», а с другой – водопроводящими свойствами почвенного слоя (Роде, 1969). А. М. Глобус (1987) рассматривал влагоемкость почвы как зависимость объемного содержания влаги от капиллярно-сорбционного (матричного) давления воды, которое называется «основной гидрофизической характеристикой» (ОГХ). В зарубежной литературе влагоудерживающая способность почв также определяется через объемную влажность и матричный потенциал (англ. *Matrix potential*) от 0 до 10.000.000 гПа и затем пересчитывается в форме отрицательного десятичного логарифма как значение рF ($p = \text{потенциал}$, $F = \text{«свободная энергия» воды}$) – ($pF = \lg P [-\text{гПа см}^{-1}]$). В результате рF имеет пределы от 1 до 7, которые характеризуют состояния почвы от насыщенной влагой до сухой (Ehlers, 1996).

Известно, что существует связь между водоудерживающей способностью почвы, а также её механическим составом и порозностью, которая описывается в виде кривых зависимости капиллярного давления и объемной влажности почвы (Hartge, Horn, 2014). Согласно общепринятой практике, значения рF от 1,8 до 2,5 соответствуют *полевой влагоемкости* (англ. *Field Capacity* – FC) и обозначают относительно постоянное содержание воды в почве, достигаемое

после инфильтрации атмосферных осадков спустя 48 часов (Ганжара, 2001). Уровень влажности почвы, обеспечивающий достижение значений, соответствующих FC, является различным для песчаных, суглинистых и глинистых почв и зависит от региональных особенностей. Значение рF, равное 4,2, обозначает границу доступности почвенной влаги для растений, или *влажность устойчивого завядания* (англ. *Permanent Wilting Point* – PWP), при которой корни растений не способны создавать надлежащий осмотический эффект, и растения теряют тургор (Hartge, Horn, 2014). Значения между 4,2 и 2,5 соответствуют *наименьшей влагоемкости* (англ. *Available Water Capacity* – AWC). Наименьшая влагоемкость (AWC) – это доступная для растений влага, занимающая промежуточное положение между полевой влагоемкостью и PWP.

Для того чтобы оценить изменение доступности почвенной влаги для растений, следует иметь в виду, что в классе рF 2,5–4,2 почвенная влага должна быть менее доступной при приближении к верхней границе PWP (4,2 рF). В связи с этим авторы статьи считают, что для более детального анализа необходимо выделить подкласс рF для суглинистых почв, обозначающий ограниченную доступность влаги. Отдельные авторы отмечают, что в случае с суглинистыми почвами, в структуре которых значительную долю занимают «средние поры» (около 18%), значения рF 2,0–3,0 соответствуют оптимальной доступности влаги для растений (Ehlers, 1996). Также Н. Ф. Ганжара (2001) указывает, что для суглинистых почв FC и оптимально доступная влага соответствуют значению рF, равному 2,3.

В настоящей работе диапазон «оптимальной доступности почвенной влаги» соответствует значениям рF в пределах 1,8–3,0, а диапазон «пониженной доступности» почвенной влаги – в пределах 3,0–4,2. Предлагаемая обобщенная шкала классификации рF и соответствующие уровни доступности почвенной влаги приведены в табл. 1.

Таблица 1. рF – классы доступности почвенной влаги на тестовых участках

Форма влаги	Всасывающее давление (матричный потенциал) (рF)	Характеристика доступности почвенной влаги для растений
PWP	$pF \geq 4,2$	Устойчивое завядание (влага недоступна)
AWC	$3,0 \leq pF < 4,2$	Доступность пониженная
nFk	$1,8 \leq pF < 3,0$	Доступность оптимальная
G	$pF < 1,8$	Влажность избыточная (доступность пониженная)

Примечание: PWP – влажность устойчивого завядания; AWC – наименьшая полевая влагоемкость; nFk – полевая влагоемкость; G – гравитационная влага.

Методы анализа данных

Выборка данных выполненных ПГС измерений на глубинах 30, 60 и 120 см за май-сентябрь 2013–2016 гг. включает 2409 наблюдений при НТ и 1148 наблюдений при ТГО. Полученные данные составили эмпирическую основу для проведения сравнительного анализа влияния технологий на содержание и доступность почвенной влаги. Результаты наблюдений представляют собой временные ряды, имеющие множество пробелов, поэтому возможность статистического анализа и моделирования полученных результатов измерений весьма ограничена. Наиболее полными являются ряды данных наблюдений за 2013 и 2016 гг. (первый и последний год эксперимента). Именно они используются для выявления статистически значимых различий в распределении параметров и их динамике в ходе вегетации между технологиями НТ и ТГО. Для оценки статистической значимости различий между величинами температуры и влажности почвы использовались двухвыборочный тест Стьюдента (t-тест) и ранговый тест Манна-Уитни-Вилкоксона (U-тест). Анализ уровня доступности почвенной влаги и расчёт дескриптивной статистики по классам доступности (табл. 1) проведены по результатам измерения рF по полному набору данных. Все вычисления выполнены в среде R.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Климатические условия вегетационных периодов 2013–2016 гг.

По данным метеостанции «Полуямки» были рассчитаны основные агрометеорологические индикаторы (табл. 2) за вегетационные периоды 2013–2016 гг. Начало и конец вегетационных периодов определены по датам устойчивого перехода среднесуточной температуры через +5 °C.

Продолжительность вегетационных периодов в ходе эксперимента варьировалась от 178 (в 2013 г.) до 193 (в 2014 г.) дней. Наиболее теплые и влажные условия сложились в 2016 г., когда сумма активных температур за вегетационный период достигла 3035 °C, сумма осадков – 358 мм, ГТК Селянинова (1955) – 1,18. Самые холодные и сухие условия зафиксированы в 2013 г. при сумме активных температур 2389 °C и сумме осадков 236 мм. Согласно ГТК Селянинова, 2013 и 2015 гг. характеризовались как засушливые, а для 2014 и 2016 гг. было характерно обеспеченное увлажнение. Анализ распределения осадков по месяцам показал, что в засушливые годы их распределение было более равномерным, чем в годы с обеспеченным увлажнением, когда почти половина осадков выпала в июле. Наиболее благоприятным по климатическим условиям оказался 2016 г., когда доля осадков в мае-июне составляла 38%, в июле – 49%, в августе-сентябре – 13%.

Влажность и температура почвы при различных технологиях

В первый год эксперимента (2013 г.) предполагалось, что различия между основными агрофизическими параметрами почв при разных технологиях обработки будут минимальными. Динамика температуры почвы и влажности на различных глубинах за вегетационный период 2013 г. приведена на рис. 1. Видно, что в целом температурный режим на тестовых участках практически не различался, что подтвердили результаты статистических тестов на различие средних значений температуры почвы по месяцам вегетационного периода. Статистически значимых различий между двумя технологиями по показателям температуры почв не обнаружено (р-значение > 0,1).

Таблица 2. Агрометеорологические условия проведения эксперимента (стационар «Полуямки», Михайловский район, Алтайский край)

	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.
Даты устойчивого перехода через 0 °C	07.04	18.03	10.04	19.03
	08.11	25.10	01.11	12.10
Даты устойчивого перехода через +5 °C	08.04	29.03	01.04	01.04
	03.10	08.10	11.10	04.10
Даты устойчивого перехода через +10 °C	22.04	30.04	18.04	15.04
	12.09	18.09	21.09	24.09
Продолжительность вегетационного периода, дней	178	193	183	186
Сумма активных температур, °C	2389	2521	2840	3035
Сумма осадков, мм	236	260	256	358
ГТК Селянинова	0,99	1,03	0,90	1,18

Примечание: Расчеты выполнены авторами на основе часовых наблюдений за период 2013–2016 гг. по данным метеорологической станции (2020 г.).

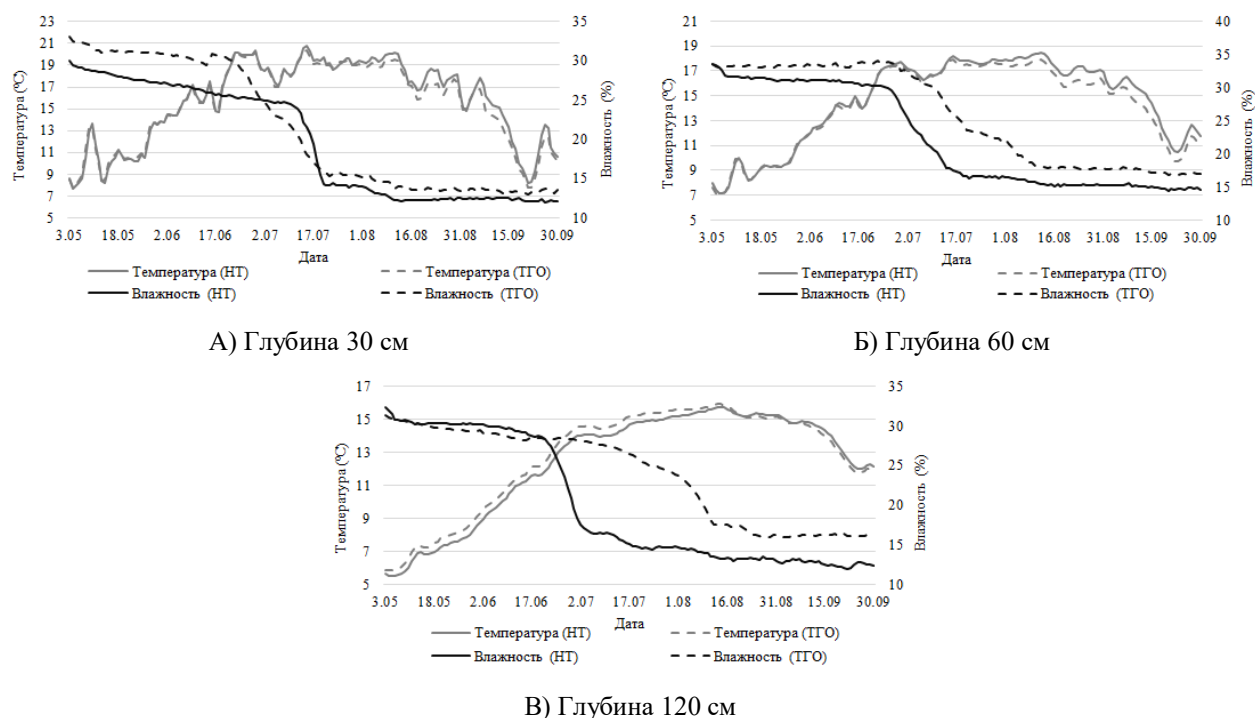


Рис. 1. Динамика температуры и влажности почвы на различных глубинах в 2013 г.

Стационар «Полуямки», Михайловский район, Алтайский край.

Выполнено авторами на основе среднесуточных данных ПГС за период 3 мая – 30 сентября 2013 г.

На начало эксперимента (01.05.2013 г.) уровень влажности почвы на глубине 30 см составлял 33,0% и 30,5% при ТГО и НТ соответственно. Такие высокие значения (от 30 до 34%) обычно не характерны для сухой степи и, вероятно, связаны с существенными зимними запасами влаги. В мае влажность незначительно варьировалась по почвенному профилю. В ходе вегетации наблюдалось практически синхронное снижение влажности почвы в слое 30–60 см (рис. 1). Динамика влаги на глубинах 60 и 120 см имела различия, обусловленные сравниваемыми технологиями. При НТ в июле и августе наблюдался более интенсивный расход влаги, чем при ТГО. В среднем за вегетационный период 2013 г. влажность почвы при ТГО была статистически значимо выше, чем при НТ, на 1,7, 3,6 и 3,9 об. % на глубинах 30, 60 и 120 см соответственно (р-значение <0.001 для U-теста и t-теста).

На четвертый год эксперимента (2016 г.) проявились заметные различия в динамике влаги и ее расходовании. Температурный режим по всему почвенному профилю был идентичным, а различия между регистрируемыми температурами – статистически незначимыми. В 2016 г. на делянке, где применялась НТ, был посеян горох, а на делянке, где

использовалась ТГО, – яровая пшеница. Несмотря на изначальные различия в значениях влажности почвы (рис. 2), НТ стала способствовать консервации почвенной влаги уже на четвертый год проведения эксперимента. Так, в 2016 г. в ходе вегетации (с 1 мая по 1 сентября) объемное содержание почвенной влаги в слое 30 см при НТ сократилось только на 2% (с 17,7 до 15,7%), в то время как при ТГО – на 9,7% (с 20,8 до 11,2%). В слое 60 см влажность почвы при НТ снизилась на 7,5% (с 22,3 до 14,8%), а при ТГО – на 7,8% (с 21,3 до 13,5%). На глубине 60 см существенных различий в показателях объемной влажности почвы и ее динамике не выявлено. Однако в глубинных слоях (120 см) при НТ отмечено более активное водопотребление, чем при ТГО. Так, снижение объемной влажности почвы при НТ составило 11,3% (с 23,3 до 12,0%), а при ТГО – только 3,8% (с 20,5 до 16,7%). Анализ различий показал, что средние значения объемной влажности почв на глубинах 30 и 60 см при НТ были выше на 4,3 и 1,4% соответственно по сравнению с ТГО, а на глубине 120 см, наоборот, запасы влаги при НТ были статистически значимо меньше – в среднем на 3,7% (р-значение $<0,001$ по t-тесту и U-тесту).

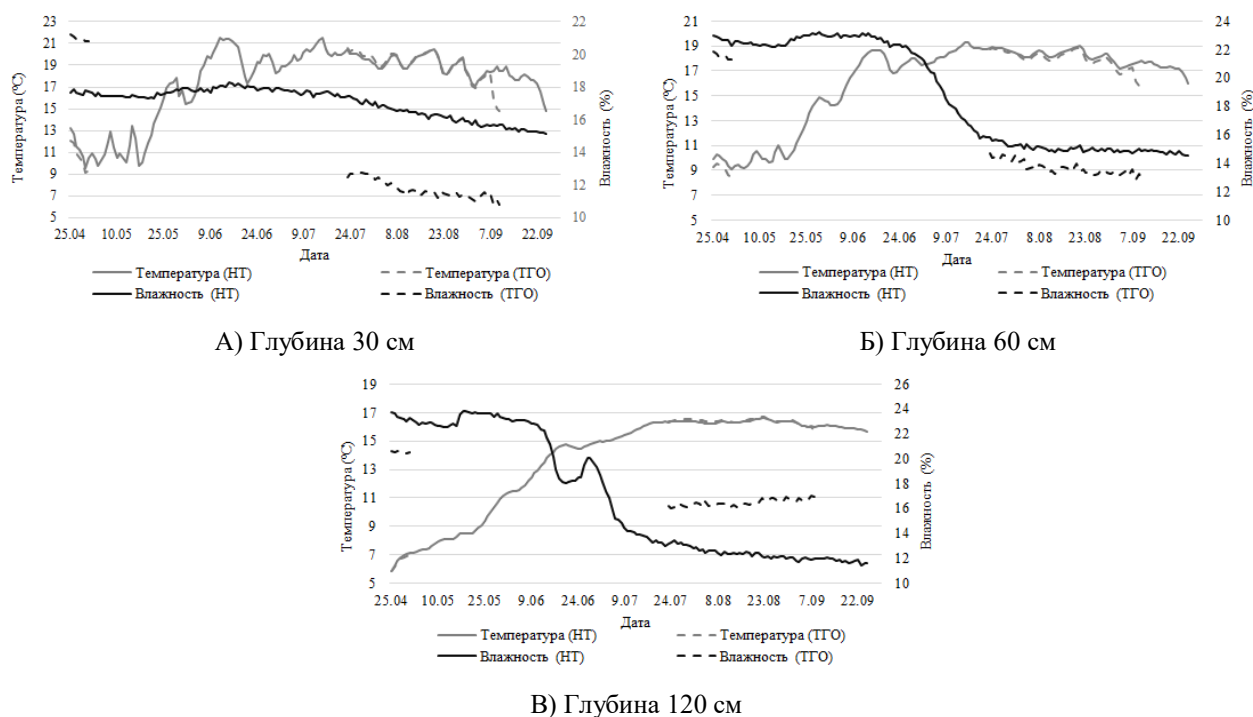


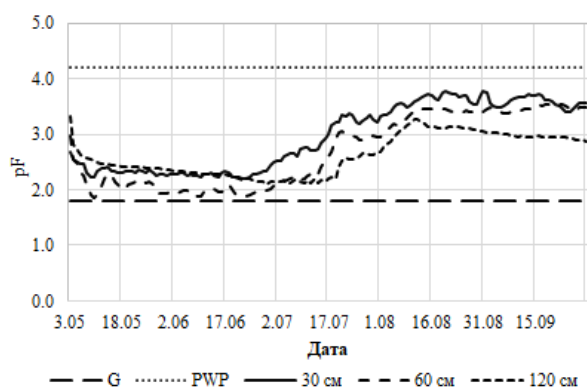
Рис. 2. Динамика температуры и влажности почвы на различных глубинах в 2016 г.
Стационар «Полуямки», Михайловский район, Алтайский край.
Выполнено авторами на основе среднесуточных данных ПГС за период 1 мая – 25 августа 2016 г.

В целом различия между показателями влажности почвы при системах НТ и ТГО могут быть объяснены разницей в толщине слоя накопленной подстилки, которая довольно медленно формируется в сухих условиях. Принимая во внимание различия между севооборотами (рапс и горох, возделываемые по нулевой технологии в 2014 и 2016 гг., характеризуются более высоким водопотреблением по сравнению с пшеницей (Geisler, 1988)), можно констатировать, что даже за краткосрочный 4-летний период прослеживаются изменения водного режима растений и, предположительно, эффект подъема влаги при обработке по НТ.

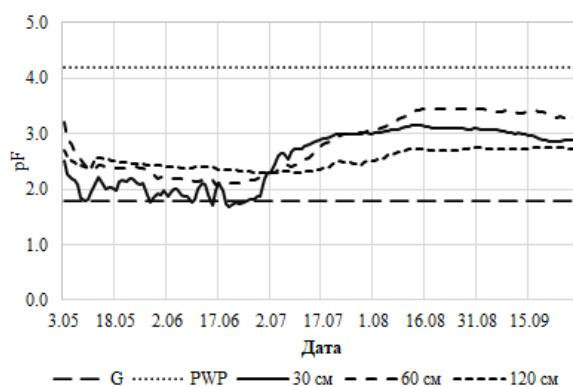
Доступность почвенной влаги при различных технологиях

Анализ и классификация результатов часовых измерений уровня pF в 2013–2016 гг. показали, что во всех почвенных горизонтах (30–60–120 см) влага, как правило, была оптимально доступной при обеих технологиях обработки. Динамика уровня pF в течение вегетационных периодов свидетельствует о том, что в первый год проведения эксперимента существенных

различий между изучаемыми технологиями не наблюдалось (рис. 3). На четвертый год проявились различия в динамике pF (рис. 4), выраженные в постепенном снижении доступности влаги к концу вегетации при НТ. В июле при НТ низкая доступность влаги (pF 3,0–4,2) отмечена в 73% наблюдений, при ТГО – в 36% наблюдений. В августе и сентябре при НТ на глубине 30–60 см был зафиксирован значительный процент случаев (от 14 до 46%) перехода через границу доступности почвенной влаги PWP. Состояние недоступности почвенной влаги для растений наблюдалось только при НТ в конце вегетационного периода. Так, при НТ переход через границу устойчивого завядания ($P_f > 4,2$) был отмечен в следующие даты: в 2014 г. – 11 сентября на глубине 30 см (4,44 pF); в 2015 г. – 15 сентября на глубине 30 см (4,60 pF); в 2016 г. – с 15 августа по 25 сентября на глубине 30 см, 24–27 сентября — на глубине 60 см (4,24–4,46 pF). Максимальные значения, превышающие предел устойчивого завядания, были зафиксированы на опытной делянке А при ТГО только на глубине 60 см в 0,5% наблюдений.

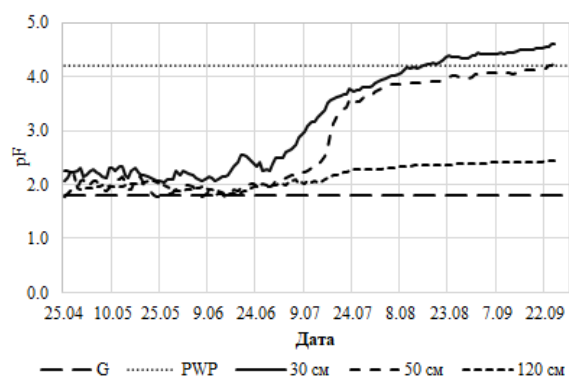


А) Нулевая технология

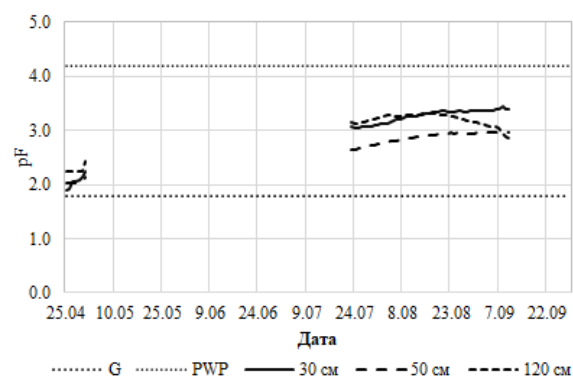


Б) Технология глубокой обработки

Рис. 3. Динамика уровня доступности почвенной влаги на различных глубинах по месяцам вегетации в 2013 г. Стационар «Полуямки», Михайловский район, Алтайский край. Выполнено авторами на основе среднесуточных данных ПГС за период 1 мая – 30 сентября 2013 г.



А) Нулевая технология



Б) Технология глубокой обработки

Рис. 4. Динамика уровня доступности почвенной влаги на различных глубинах по месяцам вегетации в 2016 г. Стационар «Полуямки», Михайловский район, Алтайский край. Выполнено авторами на основе среднесуточных данных ПГС за период 1 мая-25 августа 2016 г.

Для лучшего понимания характера изменений доступности почвенной влаги в течение вегетационного периода часовые наблюдения были классифицированы в соответствии с классами доступности по величине pF и уровню объемной влажности почвы (табл. 3 и 4).

Результаты измерений влажности почвы на глубине 30 см в период формирования урожая в мае-июне-июле свидетельствуют о некоторых преимуществах НТ. Достижение нижнего предела ($pF < 1,8$), когда влага становится недоступной, отмечено только на делянке, обрабатываемой по ТГО. Глубокая вспашка оказала положительное влияние на инфильтрацию на глубине 30 см, что подтверждается наличием гравитационной воды (класс G),

обнаруженной на глубине 30 см при ТГО в мае 2013 г. В то же время на глубине 60–120 см при ТГО гравитационная вода ($pF < 1,8$) не обнаружена (табл. 3). Переход через PWP в августе-сентябре на глубине 30 см отмечен только при НТ в 14,5% наблюдений при средней влажности почвы 13,6%. Следует заметить, что ТГО имела некоторые изначальные преимущества, поскольку делянка, на которой применялась данная технология, в 2014 г. находилась под паром, что рассматривается как один из способов накопления почвенной влаги. В то же время по НТ в 2014 г. возделывался рапс, а в 2016 г. – горох, которые характеризуются более высоким водопотреблением по сравнению с пшеницей (Geisler, 1988).

Таблица 3. Результаты классификации наблюдений почвенно-гидрологической станции при ТГО (делянка А) по двум параметрам – объемная влажность почв (%) и доступность почвенной влаги (pF), количество зарегистрированных наблюдений (%) от общего числа

Влажность почвы (%)	30 см					60 см					120 см				
	G	FC	AWC	PWP	Набл. (%)	G	FC	AWC	PWP	Набл. (%)	G	FC	AWC	PWP	Набл. (%)
10	0	0.3	8.6	0	8.9	0	0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0
12	0	1.0	13.0	0	13.9	0	0.2	1.6	0	1.7	0	0	0.0	0	0
14	0	7.4	15.7	0	23.1	0	14.5	20.5	0	35.0	0	0	6.2	0	6.2
16	0	15.0	4.8	0	19.8	0	3.9	0.6	0	4.5	0	3.8	18.2	0	22.0
18	0	2.3	0	0	2.3	0	0.1	15.9	0	16.0	0	15.5	15.5	0	31.0
20	0.1	3.2	0	0	3.3	0	0	4.0	0	4.0	0	3.7	0.0	0	3.7
22	0	3.7	0	0	3.7	0	5.2	2.0	0	7.2	0	3.9	0.0	0	3.9
24	0	2.3	0	0	2.3	0	2.4	1.7	0	4.2	0	2.2	0.0	0	2.2
26	0	1.2	0	0	1.2	0	1.2	0	0	1.2	0	3.9	0.0	0	3.9
28	0.4	0.4	0	0	0.9	0	1.0	0	0	1.0	0	5.7	0.0	0	5.7
30	2.6	1.6	0	0	4.2	0	1.0	0	0	1.0	0	17.2	0.0	0	17.2
32	3.3	11.0	0	0	14.3	0	2.5	0	0	2.5	0	4.2	0.0	0	4.2
34	0.3	1.8	0	0	2.1	0	20.1	0	0	20.1	0	0	0.0	0	0
36	0	0.1	0	0	0.1	0	0.9	0.1	0	1.0	0	0	0.0	0	0
Влажность почвы, среднее ± ст. откл.	30 ±1,8	20,5 ±7,1	12,1 ±1,9	0	16,9 ±7,4		24,2 ±8,6	15,7 ±3,4	0	19,7 ±7,9		23,2 ±5,5	15,1 ±1,2	0	19,8 ±5,7
Распределение набл. по классам (%)	6.7	51.3	42.0	0	100	0.0	53.2	46.4	0	100	0	60.1	39.9	0	100
Общее число наблюдений	1148					1148					1148				

Примечание: Расчеты выполнены авторами на основе среднесуточных наблюдений за период 2013–2016 гг. по данным почвенно-гидрологических станций (2020 г.).

Таблица 4. Результаты классификации наблюдений почвенно-гидрологической станции при НТ (делянка Б) по двум параметрам – объемная влажность почв (%) и доступность почвенной влаги (pF), количество зарегистрированных наблюдений (%) от общего числа

Влажность почвы (%)	30 см					60 см					120 см				
	G	FC	AWC	PWP	Набл. (%)	G	FC	AWC	PWP	Набл. (%)	G	FC	AWC	PWP	Набл. (%)
10	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0.3	0	0	0	0	0
12	0	0.3	1.5	3.2	5.0	0	0	0.5	0	0.5	0	6.0	4.2	0	10.2
14	0	12.5	18.5	4.5	35.4	0	0	0.8	3.0	3.8	0	24.2	14.4	0	38.5
16	0	6.2	3.4	5.0	14.5	0	0	38.3	5.5	43.8	0	8.1	0	0	8.1
18	0	16.6	10.6	1.8	29.0	0	6.5	2.6	0	9.1	0	5.2	0	0	5.2
20	0	3.2	0.1	0	3.3	0	2.6	0	0	2.6	0	4.4	0	0	4.4
22	0	0.4	0	0	0.4	0	9.8	0	0	9.8	0	2.2	0	0	2.2
24	0	1.0	0	0	1.0	2.4	18.8	0	0	21.2	0.2	22.1	0	0	22.3
26	0	4.5	0	0	4.5	0	0	0	0	0.0	0	1.0	0	0	1.0
28	0	4.6	0	0	4.6	0	0	0	0	0.0	0	0.5	0	0	0.5
30	0	2.2	0	0	2.2	0	0.6	0	0	0.6	0	3.3	0	0	3.3
32	0	0	0	0	0	0	8.3	0	0	8.3	0	4.3	0	0	4.3
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Влажность почвы, среднее ± ст. откл.		18,3 ±5,1	14,2 ±2,1	13,6 ±2,7	16,2 ±4,9	22,9 ±0,3	23,0 ±4,4	15,2 ±1,0	13,6 ±2,3	19,1 ±5,2	26,8 ±0,2	18,5 ±5,8	12,8 ±1,7	0	17,4 ±5,7
Распределение набл. по классам (%)	0	51.4	34.1	14.5	100	2.4	46.6	42.4	8.5	100	0.2	81.2	18.5	0	100
Общее число наблюдений	2409					2409					2409				

Примечание: Расчеты выполнены авторами на основе среднесуточных наблюдений за период 2013–2016 гг. по данным почвенно-гидрологических станций (2020 г.).

При ТГО 53,2% наблюдений на глубине 60 см попало в класс FC ($1,8 \leq pF < 3,0$) при средней влажности почвы 24,3% (табл. 4). Доля наблюдений при НТ, попавших в данный класс, значительно ниже — 46,6% при средней влажности 23,0%. В класс AWC ($3,0 \leq pF < 4,2$) при ТГО попало 46,4% часовых наблюдений при средней влажности почвы 15,7%, при НТ — только 42,4% наблюдений при средней влажности 15,2%. По сумме двух классов (FC и AWC) 89% всех наблюдений зарегистрировано при НТ при средней влажности почвы 19,1%, при ТГО зарегистрировано 99,6% всех наблюдений при средней влажности 19,9%. 8,5% всех наблюдений при НТ попало в класс PWP ($pF \geq 4,2$) при средней влажности почвы 13,6%, 2,4% наблюдений — в класс G ($pF < 1,8$) при средней влажности 22,9%. На делянке, обрабатываемой по ТГО, переход через PWP и G на глубине 60 см не зафиксирован.

Влагу на глубине 120 см следует рассматривать как потенциальные запасы, которые, в соответствии с современным пониманием, практически недоступны для большей части культур (Drought-resistant..., 2005). В то же время анализ содержания влаги в почве на указанной глубине позволит получить дополнительные знания о режиме и движении воды, а также её инфильтрации и поднятии при различных системах обработки почвы. При нулевой технологии в класс FC ($1,8 \leq pF < 3,0$) попало 81,2% всех наблюдений при средней влажности почвы 18,5%. При ТГО в данном классе оказалось 60,1% наблюдений, средние значения влажности были более высокими (23,2%). В класс AWC ($3,0 \leq pF < 4,2$) при ТГО попало 39,9% всех наблюдений при средней влажности почвы 15,1%, а при нулевой технологии — 18,5% при средней влажности 12,8%. На обоих опытных делянках значений, попадающих в класс PWP, не зафиксировано.

Также следует отметить различия между средними квадратичными отклонениями по

содержанию влаги при различных технологиях. Так, на глубине 30 см стандартное отклонение значений влажности при ТГО в классе FC достигло 7,1%, а при НТ — 5,1%, на глубине 60 см — 8,7 и 4,4%, а на глубине 120 см — 5,5 и 5,8% соответственно. Это свидетельствует о более высокой вариабельности содержания влаги на глубинах 30 и 60 см при технологии глубокого рыхления.

Результаты исследования позволили сделать вывод, что при НТ влага более равномерно распределяется по почвенному профилю и, кроме того, происходит формирование запаса оптимально доступной влаги на глубинах 100–120 см. При НТ 81% наблюдений на глубине 120 см относятся к классу оптимально доступной влаги, при ТГО — только 60% наблюдений. Возможно, это является эффектом «поднятия влаги», когда в период засухи растения потребляют её из нижележащих почвенных горизонтов, что свидетельствует о преимуществах использования НТ в засушливых погодных условиях. Данный вывод отчасти подтверждается результатами полевых исследований, проводимых в России на каштановых почвах и выщелоченных черноземах (Вольтерс и др., 2001; Гаврилов, Левкин, 2006; Корчагин, Новиков, 2014; Дрёпа, Голубь, 2014; Слюсарев, Подколзин, Осипов, 2017). Также следует отметить, что некоторые исследования выявили влияние возделываемой культуры и севооборота на агрофизические свойства почвы (Гаврилов, Левкин, 2006; Lafond et al., 2011; Корчагин, Новиков, 2014). В рамках настоящего исследования недоступная влага на глубине 30 см отмечена в 12–14% наблюдений под посевами рапса в сентябре 2014 г. и в 16–18% наблюдений под посевами гороха в августе и сентябре 2016 г. при использовании НТ. Авторы полагают, что такие результаты не являются препятствием для внедрения НТ, поскольку содержание влаги в почве в августе-сентябре не оказывает влияния на формирование урожайности.

ВЫВОДЫ

Комплексные инструментальные метеорологические и почвенно-гидрологические наблюдения, осуществляемые в целях совершенствования технологий земледелия, позволяют детально проанализировать динамику основных почвенно-гидрологических параметров в течение вегетационного периода. Результаты локального мониторинга климатических условий сухой степи, расположенной на территории Кулундинской равнины, показали, что количество и структура атмосферных осадков, устойчивые переходы среднесуточных температур через 0, +5, +10°C и суммы активных температур воздуха ($>10^\circ\text{C}$) за вегетационные периоды 2013–2016 гг. отражают общие закономерности и тенденции изменения климата, которые с середины 1960-х гг. характерны для сухой степи Алтайского края. Инструментальные почвенно-гидрологические измерения показали, что на фоне «обеспеченного увлажнения» (ГТК Селянинова 0,9–1,2) в течение вегетационного периода НТ имела некоторые преимущества над ТГО с точки зрения сохранения почвенной влаги. При НТ на глубине до 30 см наблюдалось меньшее снижение уровня объемной влаги в ходе вегетации по сравнению с ТГО, при этом на глубинах 60 и 120 см при НТ содержание влаги в почве было более высоким, что можно рассматривать как её потенциальные запасы для отдельных культур на случай засухи. При системе НТ отмечен период снижения доступности почвенной влаги (август – сентябрь), в указанный период также зафиксирован переход через границу устойчивого завядания $pF > 4,2$ (в основном под посевами рапса и гороха).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Алтайского края. Т. 1. М.-Барнаул: ГУГК, 1978. 222 с.
Беляев В. И., Майнель Т., Грюнвальд Л. Х., Хамман М., Ананин Д. П., Соколова Л. В. Современные агротехнологии производства сельскохозяйственных культур в Северной Америке, возможности применения инноваций в Алтайском крае // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 5(163). С. 90–101.

- Беляев В. И., Грунвальд Л., Майнелъ Т., Шмидт Г., Бондарович А. А., Щербинин В. В., Понькина Е. В., Мацюра А. В., Штефан Э., Иллигер П., Кожанов Н. А., Рудев Н. В. Водный режим почвы и урожайность сельскохозяйственных культур при различных технологиях возделывания в Кулундинской степи Алтайского края // *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія*. 2016. Т. 24. № 2. С. 531–539.
- Вольтерс И. А., Власова О. И., Трубачева Л. В. Влияние предшественников озимой пшеницы на агрофизические факторы плодородия и урожайность в условиях умеренно влажной зоны // *Агрохимический вестник*. 2001. № 4. С. 16.
- Гаврилов А. М., Левкин В. Н., Телитченко Н. И. Водно-физические свойства светло-каштановой почвы в зависимости от основной обработки чёрного пара // *Земледелие*. 2006. № 1. С. 20–21.
- Ганжара Н. Ф. Почвоведение. М.: Агроконсалт, 2001. 392 с.
- Глобус А. М. Почвенно-гидрофизическое обеспечение агроэкологических математических моделей. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 427 с.
- Дрёпа Е.Б., Голубь А.С. Физические свойства почвы при применении технологии No-Till // *Вестник АПК Ставрополя*. 2014. № 4(16). С. 181–185.
- Корчагин В. А., Новиков В. Г. Почвозащитные и влагосберегающие технологические комплексы возделывания зерновых культур в сухостепных районах Среднего Заволжья // *Достижения науки и техники АПК*. 2009. № 4. С. 12–14.
- Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 286 с.
- Слюсарев В. Н., Подколзин О. А., Осипов А. В. Действие агротехнологий с использованием системы нулевой обработки почвы на физико-химические свойства чернозема выщелоченного Прикубанской низменности и урожайность полевых культур // *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур*. 2017. Вып. 4(172). С. 52–60.
- Сляднев А. П. Географические основы климатического районирования и опыт их применения на юго-востоке Западно-Сибирской равнины // *География Западной Сибири*. Новосибирск, 1965. С. 3–122.
- Харламова Н. Ф. Оценка и прогноз современных изменений климата Алтайского региона: автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2012. 19 с.
- Baig M. N., Gamache P. M. The Economic, Agronomic and Environmental Impact of No-Till on the Canadian Prairies // *Alberta Reduced Tillage Linkages*. Canada, 2009. 134 pp.
- Derpsch R., Friedrich T., Kassam A., Hongwen L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2010, v. 3, pp. 1–25.
- Drought-resistant soils Optimization of soil moisture for sustainable plant production. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2005. 51 pp.
- Ehlers W. Wasser in Boden und Pflanze Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Stuttgart. Verlag Eugen Ulmer, 1996. 272 p.
- Frühauß M., Meinel T., Schmidt G. The Virgin Lands Campaign (1954–1963) Until the Breakdown of the Former Soviet Union (FSU): With Special Focus on Western Siberia, in: KULUNDA: Climate Smart Agriculture, Innovations in Landscape Research. Springer International Publishing, Cham., 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-15927-6_8.
- Geisler G. Pflanzenbau. Ein Lehrbuch biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion. 2. Aufl. Verlag Paul Parey Berlin und Hamburg, 1988. 520 p.
- Hartge K. H., Horn R. Einführung in die Bodenphysik. Stuttgart: Schweizerbart, 2014. 363 p.
- Kassam A., Friedrich T., Derpsch R. Global spread of conservation agriculture // *International Journal of Environmental Studies*, 2019. DOI: 10.1080/00207233.2018.1494927.
- Lafond G. P., Walley F., May W. E., Holzapfel C. B. Long term impact of No-Till on soil properties and crop productivity on the Canadian prairies // *Soil & Tillage Research*, 2011, v. 117, pp. 110–123.
- Lal R., Reicosky D. C., Hanson J. D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming // *Soil and Tillage Research*, 2007, v. 93, pp. 1–12.
- Lindwall C. W., Sonntag B. Landscape Transformed: The History of Conservation Tillage and Direct Seeding, Knowledge Impact in Society. University of Saskatchewan, Saskatoon, 2010. 106 p.
- Mirschel W., Berg-Mohnicke M., Wieland R., Wenkel K.-O., Terleev V. V., Topaj A., Mueller L. Modelling and Simulation of Agricultural Landscapes // *Landscape Modelling and Decision Support*. Springer International Publishing, Cham. (in press), 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-37421-1_1.
- Scheffer F., Schachtschabel P., Blume H.-P., Brümmer G. W., Horn R., Kandeler E., Kögel-Knabner I., Kretschmar R., Stahr K., Wilke B.-M. Lehrbuch der Bodenkunde. Springer, 2010. 550 p.

REFERENCES

- Atlas Altayskogo kraya* [Atlas of Altai Territory]. Т. 1. Moscow-Barnaul: Publishing house GUGK, 1978. 222 p.
- Belyayev V. I., Maynel' T., Gryunval'd L. H., Hamman M., Ananin D. P., Sokolova L. V. Sovremennyye agrotekhnologii proizvodstva sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v Severnoy Amerike, vozmozhnosti primeneniya innovatsiy v Altayskom kraye [Modern agricultural technologies for crop production in North America, opportunities for innovation in the Altai Territory] // *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018, no. 5(163), pp. 90–101.

- Belyayev V. I., Gryunval'd L., Maynel' T., Shmidt G., Bondarovich A. A., Shcherbinin V. V., Pon'kina E. V., Matsyura A. V., Shtefan Je., Illiger P., Kozhanov N. A., Rudev N. V. Vodnyy rezhim pochvy i urozhaynost' sel'skokhozyaystvennykh kul'tur pri razlichnykh tekhnologiyakh vozdeystviya v Kulundinskoj stepi Altayskogo kraja [Soil water regime and crop yields at different cultivation technologies in Kulunda steppe of Altai krai] // *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Biologiya. Ekologiya*, 2016, no. 2, pp. 531–539.
- Vol'ters I. A., Vlasova O. I., Trubacheva L. V. Vliyaniye predshestvennikov ozimoy pshenitsy na agrofizicheskiye faktory plodorodiya i urozhaynost' v usloviyah umerenno vlazhnoy zony [Influence of winter wheat predecessors on agro-physical factors of fertility and yield in moderately wet conditions] // *Agrokhimicheskiy vestnik*, 2001, no. 4, pp. 16.
- Gavrilov A. M., Levkin V. N., Telitchenko N. I. Vodno-fizicheskiye svoystva svetlo-kashtanovoy pochvy v zavisimosti ot osnovnoy obrabotki chyornogo para [Water-physical properties of light chestnut soil depending on the main black steam tillage] // *Zemledeliye*, 2006, no. 1, pp. 20–21.
- Ganzhara N. F. *Pochvovedeniye* [Soil Science]. Moscow: Publishing House «Agrokonsalt», 2001, 392 p.
- Globus A. M. *Pochvenno-gidrofizicheskoye obespecheniye agroekologicheskikh matematicheskikh modeley* [Soil-hydrophysical support of agroecological mathematical models]. Leningrad: Publishing House Gidrometeoizdat, 1987, 427 p.
- Dryopa E. B., Golub' A. S. Fizicheskiye svoystva pochvy pri primenenii tekhnologii No-Till [Physical properties of soil at application of No-Till technology]. *Vestnik APK Stavropol'ya*, 2014, no. 4(16), pp. 181–185.
- Korchagin B. A., Novikov V. G. Pochvozashchitnyye i vlagosberegayushchiye tekhnologicheskiye komplekсы vozdeystviya zernovykh kul'tur v sukhostepnykh rayonakh Srednego Zavolzh'ya [Soil protection and moisture-saving technological complexes of grain crops cultivation in the dry-steppe areas of the Middle Volga region]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2009, no. 4, pp. 12–14.
- Rode A. A. *Osnovy ucheniya o pochvennoy vlage* [Basics of the teachings on soil moisture]. Leningrad: Publishing House Gidrometeoizdat, 1969, 286 p.
- Slyusarev V. N., Podkolzin O. A., Osipov A. V. Deystviye agrotekhnologiy s ispol'zovaniyem sistemy nulevoy obrabotki pochvy na fiziko-khimicheskiye svoystva chernozema vyshchelochennogo Prikubanskoy nizmennosti i urozhaynost' polevykh kul'tur [Effects of agro-technologies using the no-tillage system on the physical and chemical properties of black soil leached in the Kuban lowland and the yield of field crops] // *Maslichnyye cul'tury. Nauchno-tekhnicheskiy bulletin' vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta maslichnykh kul'tur*, 2017, no. 4(172), pp. 52–60.
- Slyadnev A. P. Geograficheskiye osnovy klimaticheskogo rayonirovaniya i opyt ikh primeneniya na yugo-vostoke Zapadno-Sibirskoy ravniny [Geographic bases of climatic zoning and experience of their application in the south-east of the West Siberian Plain] // *Geografiya Zapadnoy Sibiri*, Novosibirsk, 1965, pp. 3–122.
- Kharlamova N. F. *Otsenka i prognoz sovremennykh izmeneniy klimata Altayskogo regiona*: avtoref. diss. ... kand. geogr. nauk [Assessment and Forecast of Modern Climate Changes in the Altai region. Thesis of PhD Dissertation]. Barnaul: Publishing House of Altai State University, 2012, 19 p.
- Baig M. N., Gamache P. M. The Economic, Agronomic and Environmental Impact of No-Till on the Canadian Prairies // *Alberta Reduced Tillage Linkages*. Canada, 2009. 134 pp.
- Derpsch R., Friedrich T., Kassam A., Hongwen L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main // *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2010, v. 3, pp. 1–25.
- Drought-resistant soils Optimization of soil moisture for sustainable plant production. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2005. 51 pp.
- Ehlers W. Wasser in Boden und Pflanze Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Stuttgart. Verlag Eugen Ulmer, 1996. 272 p.
- Frühauß M., Meinel T., Schmidt G. The Virgin Lands Campaign (1954–1963) Until the Breakdown of the Former Soviet Union (FSU): With Special Focus on Western Siberia, in: KULUNDA: Climate Smart Agriculture, Innovations in Landscape Research. Springer International Publishing, Cham., 2020. DOI:10.1007/978-3-030-15927-6_8.
- Geisler G. Pflanzenbau. Ein Lehrbuch biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion. 2. Aufl. Verlag Paul Parey Berlin und Hamburg, 1988. 520 p.
- Hartge K. H., Horn R. Einführung in die Bodenphysik. Stuttgart: Schweizerbart, 2014. 363 p.
- Kassam A., Friedrich T., Derpsch R. Global spread of conservation agriculture // *International Journal of Environmental Studies*, 2019. DOI: 10.1080/00207233.2018.1494927.
- Lafond G. P., Walley F., May W. E., Holzapfel C. B. Long term impact of No-Till on soil properties and crop productivity on the Canadian prairies // *Soil & Tillage Research*, 2011, v. 117, pp. 110–123.
- Lal R., Reicosky D. C., Hanson J. D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming // *Soil and Tillage Research*, 2007, v. 93, pp. 1–12.
- Lindwall C. W., Sonntag B. Landscape Transformed: The History of Conservation Tillage and Direct Seeding, Knowledge Impact in Society. University of Saskatchewan, Saskatoon, 2010. 106 p.
- Mirschel W., Berg-Mohnicke M., Wieland R., Wenkel K.-O., Terlev V. V., Topaj A., Mueller L. Modelling and Simulation of Agricultural Landscapes // *Landscape Modelling and Decision Support*. Springer International Publishing, Cham. (in press), 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-37421-1_1.
- Scheffer F., Schachtschabel P., Blume H.-P., Brümmer G. W., Horn R., Kandeler E., Kögel-Knabner I., Kretschmar R., Stahr K., Wilke B.-M. Lehrbuch der Bodenkunde. Springer, 2010. 550 p.