

Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 8. – S. 10-13.

6. Trofimov I.T., Ivanov A.N., Stupina L.A. Serye lesnye pochvy Ob-Chumyshskogo mezhdurechya i povyshenie ikh plodorodiya: monografiya. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2005. – 135 s.

7. Chudnovskiy A.F. Fizika teploobmenov v pochve. – M.-L.: Gostekhizdat, 1948. – 220 s.

8. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv. – M.: Agropromizdat, 1986. – 416 s.

9. Lunin A.I. Impulsnyy metod opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik vlazhnykh materialov: dis. ... kand. tekhn. nauk. – M., 1972. – 139 s.

10. Panfilov V.P., Chashchina N.I. Osobennosti povedeniya vlagi v supeschanykh i suglinistykh avtomorfnykh pochvakh v svyazi s ikh poroznostyu // Izv. SO AN SSSR. Biologiya. – 1975. – Vyp. 1. – S. 3-7.

11. Panfilov V.P., Makarychev S.V., Lunin A.I., Chashchina N.I. Nekotorye zakonomernosti vlagoperenosa v pochvakh raznogo mekhanicheskogo sostava // Problemy pochvovedeniya. – M.: Nauka, 1982. – S. 13-17.



УДК 631.423.2

А.Г. Болотов, С.В. Макарычев, В.Ю. Патрушев  
A.G. Bolotov, S.V. Makarychev, V.Yu. Patrushev

## ОСНОВНАЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЧЕРНОЗЕМОВ АЛТАЙСКОГО ПРИОБЬЯ В УСЛОВИЯХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ МЕЛИОРАЦИЙ

### WATER RETENTION CURVE OF THE ALTAI REGION'S OB RIVER AREA CHERNOZEMS UNDER IRRIGATION RECLAMATION

**Ключевые слова:** оросительные мелиорации, чернозем, гидрофизические свойства почв, основная гидрофизическая характеристика.

Рассмотрены результаты исследования основной гидрофизической характеристики (ОГХ) чернозема выщелоченного Алтайского Приобья в условиях оросительных мелиораций, характеризующей всю совокупность физических свойств и являющейся своеобразным интегральным «паспортом почвы», реагирующим на любые внешние воздействия и изменения. Почвы на опытном участке представлены черноземами выщелоченными среднесуглинистыми малогумусными средне- и маломощными. Найденны гидрофизические параметры модели ОГХ ван Генухтена, которые зависят от физических и физико-химических свойств почв. Выявлено, что наименьшая водоудерживающая способность мелиорируемого чернозема выщелоченного характерна для верхнего гумусового горизонта, что свидетельствует о его физической деградации. Пахотный горизонт чернозема по водоудерживающей способности соответствует каштановой легкосуглинистой почве сухой степи. Полученные параметры могут быть использованы в имитационном моде-

лировании водного режима деградированного чернозема в условиях оросительных мелиораций.

**Keywords:** irrigation reclamation, chernozem, hydro-physical soil properties, soil water retention curve (WRC).

The results of the studies of the water retention curve (WRC) of leached chernozem of the Altai Region' Ob River area under irrigation reclamation are discussed; this curve defines the totality of the physical properties being a kind of integral "soil passport" responding to any external effects and changes. The soils of the trial plot are represented by leached medium-loamy low-humus medium-thick and shallow chernozems. The hydrophysical parameters of van Genuchten WRC model have been determined; they depend on the physical and physico-chemical soil properties. It has been found that the least water-retaining capacity of reclaimed leached chernozem is typical of the top humus horizon which indicates its physical degradation. Regarding its water retention capacity, the arable horizon of chernozem corresponds to light loamy chestnut soil of the dry steppe. The obtained parameters may be used to simulate the water regime of degraded chernozem under irrigation reclamation.

**Болотов Андрей Геннадьевич**, к.с.-х.н., доцент, каф. метеорологии и климатологии, фак-т агрономии и биотехнологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева. Тел.: (499) 977-73-55. E-mail: agbolotov@gmail.com.

**Bolotov Andrey Gennadyevich**, Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Chair of Meteorology and Climatology, Russian State Agricultural University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy. Ph.: (499) 977-73-55. E-mail: agbolotov@gmail.com.

**Макарычев Сергей Владимирович**, д.б.н, проф., зав. каф. физики, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-83-53. E-mail: makar@asau.ru.

**Патрушев Владимир Юрьевич**, аспирант, каф. физики, Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: makar@asau.ru.

**Makarychev Sergey Vladimirovich**, Dr. Bio. Sci., Prof., Head, Chair of Physics, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-83-53. E-mail: makar@asau.ru.

**Patrushev Vladimir Yuryevich**, post-graduate student, Altai State Agricultural University. E-mail: makar@asau.ru.

### Введение

Закономерности формирования гидротермического режима почвы в значительной мере определяются ее тепло- и гидрофизическими свойствами, которые, в свою очередь, зависят от гранулометрического состава, плотности, влажности, температуры, порозности, содержания органического вещества. Это предопределяет, с одной стороны, неоднородность почв по тепло- и гидрофизическим параметрам, а с другой, – большие практические возможности для моделирования и прогнозирования мелиоративных эффектов различных агромероприятий, а также обоснования наиболее рациональных оросительных мелиоративных технологий. При математическом моделировании режима влажности в почве необходимо знать ее гидрофизические функции. Гидрофизические функции почв (основная гидрофизическая характеристика (ОГХ) и функция влагопроводности) характеризуют всю совокупность физических свойств и являются своеобразным интегральным «паспортом почвы», реагирующим на любые внешние воздействия и изменения [1-4].

Кроме моделирования влагопереноса применение гидрофизических функций является перспективным в области сравнения гидравлических свойств различных типов почв и почвенных горизонтов. Их также можно использовать при описании характеристики пространственной изменчивости гидравлических свойств почвы по всему ландшафту. Водоудерживающая способность почв применяется при рассмотрении методических подходов к системе оценки ресурсного потенциала земель сельскохозяйственного назначения с целью наиболее полного и рационального использования естественно-природных ресурсов при проектировании адаптивно-ландшафтных систем земледелия [5]. Аналитические функции, описывающие гидрофизические свойства позволяют с помощью интерполяции или экстраполяции, в широком диапазоне влагосодержания, восстанавливать части кривых водоудерживания и гидравлической проводимости, для которых мало или вообще нет данных, а также способствуют более эффективной обработке данных в

математических моделях ненасыщенного влагопереноса. Но при этом возникает проблема применимости известных гидрофизических функций в почвах, отличающихся по свойствам от тех, для которых они были получены.

**Целью** работы было изучение гидрофизических свойств чернозема выщелоченного Алтайского Приобья в условиях оросительных мелиораций.

В ходе исследований решались следующие **задачи**:

- 1) определение основной гидрофизической характеристики чернозема выщелоченного в условиях оросительных мелиораций;
- 2) аппроксимация полученных экспериментальных данных функцией модели ОГХ ван Генухтена.

### Объекты и методы

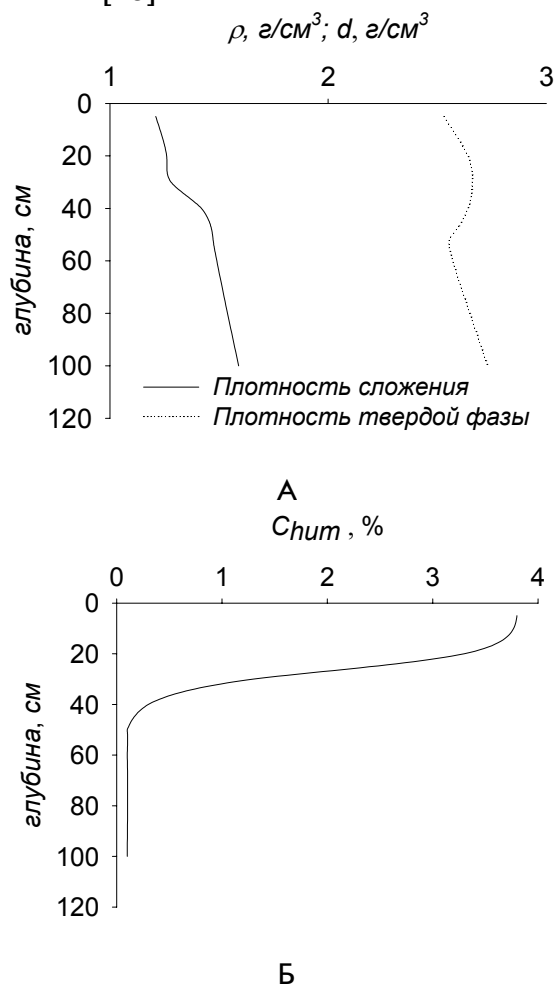
Экспериментальные исследования по изучению гидрофизических свойств почв проводились в Первомайском районе Алтайского края на территории Лосихинской оросительной системы. **Объект** исследования – чернозем выщелоченный, **предмет** – гидрофизические свойства почвы. В геоморфологическом отношении массив орошения расположен в пределах гривнобугристой поверхности IV надпойменной террасы р. Оби. Источником орошения системы является р. Лосиха, правый приток р. Оби, образуемая слиянием двух ручьев, стекающих с Бие-Чумышской возвышенности.

Капиллярно-сорбционное давление влаги в зависимости от объемной влажности определено по данным о кинетике дренирования **методом** центрифугирования [6-8] на центрифуге TG16WS. Физические и физико-химические свойства почвы изучены с использованием общепринятых в почвоведении методик [9].

### Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный среднемощный малогумусный среднесуглинистый. Гумусовый горизонт слабо структурирован, но в целом по показателю коэффициента дисперсности ис-

следуемый чернозем оказывается хорошо структурированным. Плотность сложения чернозема с глубиной возрастает от 1,21 до 1,59 г/см<sup>3</sup> (рис. 1). Исследованная почва имеет низкое содержание гумуса (1,3-3,7%) и очень низкий показатель нитратного азота в почве. Содержание подвижного фосфора и обменного калия достаточно высокое [10].



**Рис. 1. Профильное распределение плотности сложения и плотности твердой фазы (А), а также содержания гумуса (Б) в черноземе выщелоченном**

Дифференцированность почвенного профиля по физическим и физико-химическим свойствам нашла отражение в распределении гидрофизических параметров по почвенным горизонтам мелиоративного чернозема. В работе определены ветви иссушения гистерезисной петли ОГХ (кривые водоудерживания) (рис. 2), т.к. в естественных условиях в почвах обычно быстро протекающий процесс их увлажнения (при осадках или поливах) сменяется сравнительно длинным периодом иссушения [1].

На рисунке 2 видно, что вид кривых водоудерживания мелиоративного чернозема имеет типичную выположенную S-образность с дифференциацией по горизонтам в области капиллярной и гравитационной влаги, что объясняется изменением содержания гумуса и плотности сложения в совокупности с изменением содержания гранулометрических фракций по профилю. Величины капиллярно-сорбционных давлений при переходе от материнской породы к пахотному горизонту по мере увеличения содержания гумуса и уменьшения плотности сложения и, несмотря на утяжеление гранулометрического состава, изменяются в сторону увеличения. При этом происходит смещение кривых ОГХ вправо, в область больших влажностей.

Важной особенностью рассматриваемого мелиоративного чернозема является физическая деградация его пахотного горизонта, о чем свидетельствует смещенная влево кривая водоудерживания данного горизонта относительно кривой гор. АВ. Значения водоудерживающей способности данных горизонтов совпадают в области гравитационной влаги, а в капиллярной и капиллярно-сорбционной области водоудерживающая способность пахотного горизонта приближается к значениям почвообразующей породы. Из этого следует необходимость восстановления оптимальных агрофизических свойств или увеличения оросительных норм для деградированных почв, при этом значения предполивного порога влажности и в целом диапазона легкодоступной влаги уменьшатся. Однако при увеличении оросительных норм деградационные процессы усилятся еще в большей степени.

Для количественного анализа водоудерживающей способности почвенного профиля мелиоративного чернозема используем параметрический подход [7]. Для этого полученные экспериментальные ОГХ  $P(\kappaПа) = f(\theta)$  основных диагностических горизонтов чернозема выщелоченного Алтайского Приобья в условиях орошения аппроксимируем функцией ван Генухтена [11, 12]:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha P)^n\right]^m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n},$$

где  $\theta$  – объемная влажность почвы, см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>;

$\theta_r$  – параметр минимальной влажности, соответствующий прочносвязанной,

неподвижной для вязкого течения влаги,  $\text{см}^3/\text{см}^3$ ;

$\theta_s$  – объемная влажность почвы, соответствующая полному влагонасыщению,  $\text{см}^3/\text{см}^3$ ;

$\alpha$  и  $n$  – эмпирические константы, характеризующие давление барботирования и наклон ОГХ.

Полученные гидрофизические параметры  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $n$  и  $\alpha$  с учетом изменения их по профилю представлены в таблице.

Из данных таблицы следует, что параметр  $\theta_r$  и давление барботирования ( $1/\alpha$ ) пахотного горизонта имеют наименьшее значение по сравнению с этими параметрами нижележащих горизонтов, что подтверждает предположение о физической

деградации чернозема в условиях оросительных мелиораций.

Гидрофизические параметры пахотного горизонта мелиоративного чернозема имеют меньшие значения по сравнению со средними значениями по данной почвенно-климатической зоне [7]. Данный почвенный горизонт по водоудерживающей способности соответствует каштановой почве сухой степи легкосуглинистого гранулометрического состава [13]. Полученные гидрофизические параметры можно использовать в динамическом моделировании режима влажности черноземов в условиях оросительных мелиораций. Дальнейшие исследования будут направлены на выявление влияния точности задания ОГХ на погрешность моделирования режима влажности мелиоративных черноземов.

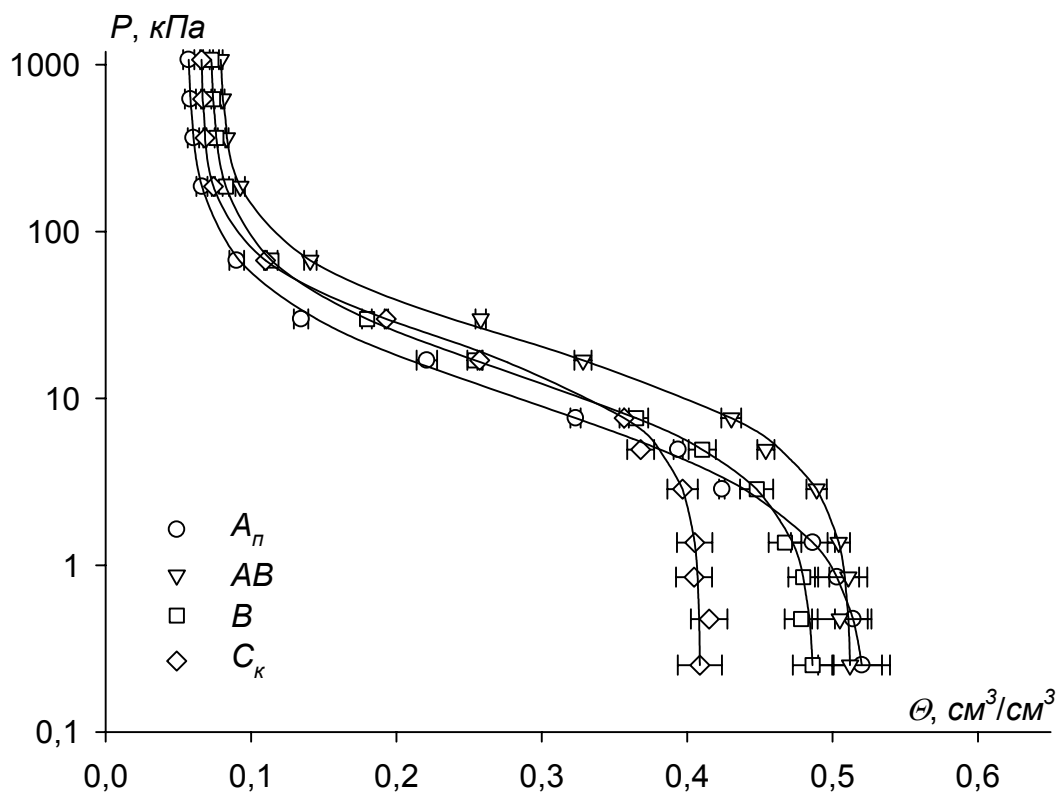


Рис. 2. Основная гидрофизическая характеристика чернозема в условиях оросительных мелиораций

Таблица

Гидрофизические параметры модели ОГХ ван Генухтена мелиоративных черноземов Алтайского Приобья

Гор.	$\theta_r, \text{см}^3/\text{см}^3$	$\theta_s, \text{см}^3/\text{см}^3$	$\alpha, 1/\text{см}$	$n, (-)$
$A_n$	$0,047 \pm 0,011$	$0,515 \pm 0,038$	$0,021 \pm 0,005$	$1,83 \pm 0,06$
$AB$	$0,070 \pm 0,012$	$0,508 \pm 0,029$	$0,009 \pm 0,003$	$2,02 \pm 0,06$
$B$	$0,063 \pm 0,012$	$0,482 \pm 0,031$	$0,013 \pm 0,004$	$1,90 \pm 0,07$
$C_k$	$0,061 \pm 0,013$	$0,406 \pm 0,027$	$0,007 \pm 0,008$	$2,17 \pm 0,07$

**Выводы**

1. Наименьшая водоудерживающая способность мелиорированного чернозема выщелоченного Алтайского Приобья характерна для верхнего гумусового горизонта, что свидетельствует о его физической деградации.

2. Пахотный горизонт чернозема по водоудерживающей способности соответствует каштановой легкосуглинистой почве сухой степи.

3. Полученные параметры могут быть использованы в имитационном моделировании водного режима деградированного чернозема в условиях оросительных мелиораций.

**Библиографический список**

1. Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. – М.: Изд-во МГУ, 1984.

2. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Хайдапова Д.Д., Шевченко Е.М. Экологическая оценка биофизического состояния почв. – М.: МГУ, 1999. – 48 с.

3. Смагин А. Теория и методы оценки физического состояния почв // Почвоведение. – 2003. – № 3. – С. 328-341.

4. Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Рождественская Т.А., Балькин С.Н. Сравнительный анализ основной гидрофизической характеристики степных и горно-лесных почв Алтая, восстановленной расчетными методами // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 12. – С. 29-35.

5. Турусов В.И., Гармашов В.М., Сальников М.И., Нужная Н.А., Гаврилова С.А. Новые подходы к оценке биоклиматического потенциала при проектировании адаптивно-ландшафтных систем земледелия // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 12. – С. 12-15.

6. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Мизури Маауиа Бен-Али. Определение основной гидрофизической характеристики почв методом центрифугирования // Почвоведение. – 1998. – № 11. – С. 1362-1370.

7. Болотов А.Г. Гидротермическое состояние почв юго-востока Западной Сибири: дис. ... докт. биол. наук. – М.: МГУ им. Ломоносова, 2016. – 351 с.

8. Болотов А.Г., Макарычев С.В. Гидрофизические свойства почв юго-востока Западной Сибири. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2015. – 129 с.

9. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. – М.: Агропромиздат, 1986. – 416 с.

10. Макарычев С.В., Зайкова Н.И., Патрушев В.Ю. Регулирование водного режима чернозема при орошении овощных культур // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 2. – С. 56-61.

11. van Genuchten M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1980. – Vol. 44. – P. 892-898.

12. Шейн Е.В. Курс физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.

13. Болотов А.Г., Шейн Е.В., Милановский Е.Ю., Тюгай З.Н., Початкова Т.Н. Основные гидрофизические характеристики каштановых почв сухой степи Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 9. – С. 36-41.

**References**

1. Voronin A.D. Strukturno-funktsionalnaya gidrofizika pochv. – M.: Izd-vo MGU, 1984.

2. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Khaydapova D.D., Shevchenko E.M. Ekologicheskaya otsenka biofizicheskogo sostoyaniya pochv. – M.: MGU, 1999. – 48 s.

3. Smagin A. Teoriya i metody otsenki fizicheskogo sostoyaniya pochv // Pochvovedenie. – 2003. – № 3. – S. 328-341.

4. Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Rozhdestvenskaya T.A., Balykin S.N. Sravnitelnyy analiz osnovnoy gidrofizicheskoy kharakteristiki stepnykh i gorno-lesnykh pochv Altaya, vosstanovlennoy raschetnymi metodami // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – № 12. – S. 29-35.

5. Turusov V.I., Garmashov V.M., Salnikov M.I., Nuzhnaya N.A., Gavrilova S.A. Nove podkhody k otsenke bioklimaticheskogo potentsiala pri proektirovanii adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. – 2013. – № 12. – S. 12-15.

6. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Mizuri Maauia Ben-Ali. Opredelenie osnovnoy gidrofizicheskoy kharakteristiki pochv metodom tsentrifugirovaniya // Pochvovedenie. – 1998. – № 11. – S. 1362-1370.

7. Bolotov A.G. Hidrotermicheskoe sostoyanie pochv yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri: dis. ... dokt. biol. nauk. – M.: MGU im. Lomonosova, 2016. – 351 s.

8. Bolotov A.G., Makarychev S.V. Hidrofizicheskie svoystva pochv yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri. – Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2015. – 129 s.

9. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv.* – M.: Agropromizdat, 1986. – 416 s.

10. Makarychev S.V., Zaykova N.I., Patrushev V.Yu. *Regulirovanie vodnogo rezhima chernozema pri oroshenii ovoshchnykh kultur // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* – 2017. – № 2. – S. 56-61.

11. van Genuchten M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conduc-

tivity of unsaturated soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 1980. – Vol. 44. – P. 892-898.

12. Shein E.V. *Kurs fiziki pochv.* – M.: Izd-vo MGU, 2005. – 432 s.

13. Bolotov A.G., Shein E.V., Milanovskiy E.Yu., Tyugay Z.N., Pochatkova T.N. *Osnovnye gidrofizicheskie kharakteristiki kashtanovykh pochv sukhoy stepi Altayskogo kraya // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* – 2014. – № 9. – S. 36-41.



УДК 542.6:546.56:633.853.494



М.Т. Койгельдинова, А.С. Торопов  
M.T. Koygeldinova, A.S. Toropov

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТОРОВ ФИТОЭКСТРАКЦИИ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РАСТЕНИЯ *BRASSICA NAPUS*

#### USE OF PHYTOEXTRACTION EFFECTORS TO INCREASE HEAVY METALS INTAKE BY *BRASSICA NAPUS* PLANTS

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, фитоэкстракция, фиторемедиация, хелатообразующие агенты, загрязнение почвы, полиэлементное загрязнение, рапс яровой (*Brassica napus*), Na-ЭДТА, вынос металлов, аккумуляция.

Представлены данные по индуцируемой фитоэкстракции тяжелых металлов рапсом яровым (*Brassica napus*), выращенных в условиях моно- и полиэлементного загрязнения почвы. Цель исследования – провести сравнительное изучение влияния лимонной, щавелевой кислот и Na-ЭДТА на повышение накопления и выноса тяжелых металлов растениями *Brassica napus* в условиях модельного загрязнения темно-каштановой почвы. Накопление токсичных элементов в побегах *B. napus* зависело от типа и дозы применяемого хелатообразующего агента. Внесение Na-ЭДТА в дозе 2 ммоль/кг способствовало увеличению содержания меди в побегах *B. napus* при медном загрязнении почвы в дозе 1 ПДК в 6,5 раза и в дозе 3 ПДК – в 8,3 раза относительно контроля. При цинковом загрязнении почвы (1 и 3 ПДК) максимальное накопление цинка в побегах *B. napus* зафиксировано при использовании лимонной кислоты и Na-ЭДТА в дозе 2 ммоль/кг.

При кадмиевом загрязнении почвы (1 и 3 ПДК) значительная аккумулялирующая способность кадмия *B. napus* выявлена при внесении щавелевой кислоты в дозе 5 ммоль/кг (концентрация Cd увеличивается по отношению к контролю в 3,9 и 18 раз соответственно). Значительное увеличение содержания свинца при свинцовом загрязнении почвы отмечено при применении Na-ЭДТА в дозе 2 ммоль/кг и в дозе 5 ммоль/кг (концентрация свинца увеличивалась в 9,8-16,4 раза). В условиях полиэлементного загрязнения почвы (1 ПДК) наиболее оптимальным эффектором фитоэкстракции Cu, Zn, Pb побегами *B. napus* является Na-ЭДТА в дозе 2 ммоль/кг (концентрация меди увеличилась в среднем в 4 раза, цинка и свинца – в 2 раза). Повышение накопления кадмия *B. napus* не наблюдалось.

**Keywords:** heavy metals, phytoextraction, phytoremediation, chelating agents, soil contamination, multi-element contamination, spring rape (*Brassica napus*), Na-EDTA, metal removal, accumulation.

Induced phytoextraction of heavy metals by spring rape (*Brassica napus*) growing under the condition of mono- and multi-element soil contamination