



Научная статья

УДК 631.459:631.416:631.95

doi: 10.55186/25876740\_2022\_65\_4\_363

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДОЖДЕВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫНОСА ИЗ ПОЧВЫ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Ю.П. Сухановский, А.В. Прущик, В.А. Вытовтов, А.Г. Титов

Курский федеральный аграрный научный центр, Курск, Россия

**Аннотация.** Почвы сельскохозяйственных угодий стали диффузным источником загрязнения поверхностных водных объектов. Необходимы экспериментальные исследования выноса растворенных веществ из почвы с дождевым стоком. При отсутствии натурных наблюдений за выпадающими на почву дождями новый метод дождевания является единственным методом для проведения таких исследований. Цель работы — экспериментальные исследования влияния температуры почвы на вынос из нее растворенных биогенных веществ ( $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) и тяжелых металлов (Pb, Zn). В металлических цилиндрах с боковым водосливом были созданы одинаковые почвенные образцы. Площадь поверхности почвы  $0,049 \pm 0,001 \text{ м}^2$ . Эксперимент проведен при температурах почвы 1, 2, 17 и  $20^\circ\text{C}$ . Использована портативная дождевальная установка. Для исследуемого вещества проведены измерения концентраций в стекающей с почвы воде и в дождевой воде. Рассчитана их разность. При разности больше нуля почва теряла вещество, а при разности меньше нуля почва получала его из дождевой воды. Для всех биогенных веществ при температурах почвы 2 и  $20^\circ\text{C}$  установлено: почва потеряла эти вещества; для разных температур значения разности были одинаковыми (в пределах их погрешности). Например, для  $\text{P}_2\text{O}_5$  при  $2^\circ\text{C}$  значение разности равнялось  $1,95 \pm 0,39 \text{ мг/л}$ , а при  $20^\circ\text{C}$  значение разности —  $1,75 \pm 0,35 \text{ мг/л}$ . Цинк, наоборот, почва получила из дождевой воды: при  $1^\circ\text{C}$  значение разности равнялось  $-0,0506 \pm 0,0071 \text{ мг/л}$ , а при  $17^\circ\text{C}$  —  $-0,0420 \pm 0,0087 \text{ мг/л}$ . Для цинка при разных температурах значения разности концентраций были также одинаковыми. Для исследованных веществ в большом интервале температур почвы можно принять одно значение разности концентраций. Это упрощает исследования и расчеты выноса из почвы этих веществ. Полученные экспериментальные данные можно использовать для расчетов выноса из почвы исследованных веществ в отношении естественных дождей.

**Ключевые слова:** загрязнение поверхностных водных объектов, дождевой сток, почва, биогенные вещества, тяжелые металлы, дождевальная установка

**Благодарности:** исследование выполнено в рамках Государственного задания ФБГНУ «Курский ФАНЦ» по теме № FGZU-2022-0002.

Original article

## APPLICATION OF RAINFALL SIMULATION METHOD TO STUDY SOLUTE LOSSES FROM THE SOIL

Yu.P. Sukhanovskii, A.V. Prushchik, V.A. Vytovtov, A.G. Titov

Federal Agricultural Kursk Research Center, Kursk, Russia

**Abstract.** The soils of agricultural lands became a diffusive source contaminating surface water objects. Experimental studies of the loss of dissolved substances with rainfall runoff from the soil are needed. With the lack of full-scale observations of the rains falling out on the soil a new method of sprinkling is the only method to conduct such studies. The aim of the work is experimental study of the soil temperature effect on the loss of dissolved biogenic substances ( $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) and heavy metals (Pb and Zn) from the soil. Equal soil samples were made in a metallic cylinder with a side weir. The area of the soil surface was  $0.049 \pm 0.001 \text{ м}^2$ . The experiment was conducted at the soil temperature 1, 2, 17 and  $20^\circ\text{C}$ . A portable sprinkler was used. The concentrations of the substance studied in the rain water and in the running off the soil water were measured. The difference was calculated. When a difference greater than zero, the soil lost the substance, and when the difference is less than zero the soil received it from the rain water. For all biogenic substances it was established that the soil lost the substances at the soil temperatures 2 and  $20^\circ\text{C}$ ; for different values temperatures values were equal (within their error). For example, for  $\text{P}_2\text{O}_5$  at  $2^\circ\text{C}$  value were equal to  $1.95 \pm 0.39 \text{ mg/l}$ , and at  $20^\circ\text{C}$  difference value were equal to  $1.75 \pm 0.35 \text{ mg/l}$ . The soil obtained zinc from the rain water: at  $1^\circ\text{C}$  value were equal to  $-0.0506 \pm 0.0071 \text{ mg/l}$ , and at  $17^\circ\text{C}$  it were equal to —  $-0.0420 \pm 0.0087 \text{ mg/l}$ . For different temperatures concentration differences values were also equal. For the substances under study within a large range of soil temperatures a single concentration differences value can be assumed. That simplifies the study and the calculations of the loss of the substances from the soil. The obtained experimental data can be used for natural rainfalls.

**Keywords:** contamination of surface water objects, rain runoff, soil, biogenic substances, heavy metals, sprinkler

**Acknowledgments:** the research was carried out within the framework of the State tasks of Federal Agricultural Kursk Research Center on topic No. FGZU-2022-0002.

**Введение.** Происходит глобальное загрязнение почвы и атмосферы [1-3]. Основными источниками загрязнения почв являются минеральные удобрения, пестициды, промышленные предприятия и автотранспорт [3-7]. В дождевой воде были зарегистрированы концентрации: аммонийного азота —  $0,6-2,7 \text{ мг/л}$ , калия —  $0,1-6,0 \text{ мг/л}$ , фосфатов —  $0,0-0,3 \text{ мг/л}$ , нитратного азота —  $0,1-1,2 \text{ мг/л}$  [7]. Биогенные вещества, содержащиеся в почве сельскохозяйственных угодий, являются загрязнителями водных объектов [3, 8]. При выпадении дождя на

почву, образующего поверхностный поток воды, происходит эрозия почвы и массообмен растворенными веществами между почвой и потоком воды. Эти процессы приводят к деградации почвы, а также к заилению, эвтрофикации и загрязнению поверхностных водных объектов. С целью прогнозирования загрязнения и принятия мер разрабатывают сложные математические модели массопереноса в системе водосбор — водоток — водоем [9]. Для применения моделей и дальнейшего их развития необходимы экспериментальные исследования, в частности,

массообмена растворенными веществами между почвой и поверхностным потоком дождевой воды.

В таких исследованиях применяют дождевальные установки (ДУ). Начало их применения для исследований эрозионных потерь почвы и дождевого стока связывают с работой [10]. В настоящее время ДУ широко используют для исследования эрозии почвы, гидрологии и качества воды [11-15]. Десятилетия существовала нерешенная задача: как для естественных дождей можно использовать данные, полученные для



искусственного дождя? Решение этой задачи относится к физическому моделированию дождей, которое основано на понятии подобия и на поиске критериев подобия для искусственных и естественных дождей. В работе [16] предложены такие критерии:  $A$  — эрозионная характеристика для искусственных дождей;  $Al$  — эрозионный индекс для естественных дождей. Между ними выполняется равенство  $Al = 2,3 \cdot 10^4 A$ . Если в экспериментальной зависимости для инфильтрации величину  $A$  заменить на  $Al$ , то полученную зависимость можно использовать для естественных дождей. Метод дождевания [17] включен в Глобальную базу данных измерения инфильтрации [18]. Для исследования потерь из почвы растворенных веществ принят третий критерий подобия — одинаковое содержание этих веществ в искусственном и в естественном дожде [19]. Применение критериев подобия дает возможность экспериментальные данные, полученные для искусственного дождя, использовать для естественных дождей.

Почвы сельскохозяйственных угодий стали диффузным источником загрязнения поверхностных водных объектов. Необходимы экспериментальные исследования потерь растворенных веществ из почвы с дождевым стоком. При отсутствии натурных наблюдений за выпадающими на почву дождями новый метод дождевания является единственным методом для проведения таких экспериментальных исследований.

Физические, химические и биологические процессы, протекающие в почве, зависят от температуры почвы. Как следствие, вынос из почвы с поверхностным потоком воды растворенных веществ также зависит от температуры. В течение сезона дождей температура почвы сельскохозяйственных угодий изменяется в относительно большом интервале значений.

**Цель работы** — применение и развитие метода дождевания для исследования влияния температуры почвы на вынос из нее растворенных биогенных веществ и тяжелых металлов.

**Объект и методы исследования.** Объект исследования — процессы массообмена растворенными веществами между почвой и поверхностным дождевым потоком воды. Проведение экспериментов основано на методике с использованием портативной дождевальной установки [19]. Для любых дождей количество любого растворенного вещества, потерянного с определенной площади поверхности почвы, записано простым уравнением:

$$m = dC \cdot h, \quad dC = C_{\text{run}} - C_{\text{rain}}, \quad (1)$$

где  $m$  — вынос из почвы растворенного вещества, мг/м<sup>2</sup>;  $dC$  — изменение концентрации в стекающей воде, мг/л;  $C_{\text{run}}$  — концентрация в стекающей воде, мг/л;  $C_{\text{rain}}$  — концентрация в дождевой воде, мг/л.

При  $dC > 0$  почва теряет растворенное вещество. Это означает, что диффузия растворенного вещества направлена из почвы в поверхност-

ный поток воды и она больше конвекции. При инфильтрации конвекция всегда направлена в почву. При таких условиях вещество с дождевым стоком попадает в водные объекты. При  $dC < 0$ , наоборот, почва получает растворенное вещество из дождевой воды. Если в дожде отсутствует растворенное вещество ( $C_{\text{rain}} = 0$ ), то почва всегда его теряет.

Использована оценка погрешностей прямых и косвенных измерений, а также методов определения содержания исследованных веществ в почве и в воде. Для уменьшения погрешности использована дистиллированная вода и в некоторых вариантах внесено в почву исследуемое растворенное вещество. Во всех вариантах интенсивность дождя определена по 10 повторным измерениям, а влажность почвы — по 5. Для создания искусственного дождя использована портативная ДУ: диаметр капель —  $4,0 \pm 0,3$  мм, высота падения —  $1,0$  м, скорость капель при ударе о почву —  $V_d = 4,2$  м/с. Интенсивность дождя регулировали. Насыпные почвенные образцы подготовлены в металлических цилиндрах с боковым водосливом (почва — чернозем типичный тяжелосуглинистый). Диаметр цилиндра  $D = 25,0 \pm 0,2$  см, высота  $H = 20,3 \pm 0,2$  см. Площадь поверхности почвы, с которой стекала вода, равнялась  $S = 0,049 \pm 0,001$  м<sup>2</sup>. Влажность почвы определена термостатно-весовым методом.

Проведены две серии дождеваний в лабораторных условиях на базе лаборатории защиты почв от эрозии ФГБНУ «Курский ФАНЦ» в 2020–2021 гг. В первой серии исследован вынос из почвы биогенных веществ ( $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) для двух вариантов с разными температурами почвы. Все образцы почвы подготовлены одинаково с внесением в растворенной форме минеральных удобрений (нитроаммофоски 16:16:16 ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{KCl}$ ) в расчете  $1,5$  г/кг. В варианте 1–1 температура почвы была значительно меньше, чем в варианте 1–2. В обоих вариантах концентрация ионов определена для объема стекающей воды равного  $V = 1,00 \pm 0,01$  л. Это соответствует толщине слоя стока  $h = 20,4 \pm 0,6$  мм.

Во второй серии опытов для трех вариантов исследован вынос из почвы свинца (Pb) и цинка (Zn). В варианте 2–1 исследован вынос из почвы свинца. При подготовке почвенного образца в растворенной форме в почву был внесен свинец азотнокислый 99,50% ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) в расчете  $690$  мг/кг. В варианте 2–1 дождевание проведено при одной температуре почвы. Для определения концентрации свинца в стекающей воде использован такой же объем воды, как в первой серии. В вариантах 2–2 и 2–3 исследован вынос из почвы цинка. При подготовке образца в почву ничего не вносили. Для дождевой воды измерения концентраций цинка проведены для трех проб воды, взятых в течение 1 минуты. Для стекающей воды это сделано для четырех проб воды в начале стока. В варианте 2–2 дождевание проведено при низкой температуре почвы

и при меньшей интенсивности дождя. В варианте 2–3 повторно использован образец почвы из варианта 2–2 через 2 дня после дождевания.

Результат измерения представлен измеренным значением и его погрешностью, согласно РМГ-29-2013. Если относительная погрешность равняется или больше 100%, то измеренное значение — недостоверное. Для измерения содержания исследуемых веществ в почве и в воде использованы следующие методы и приборы. Биогенные вещества в воде (ПНД Ф 14.1:2.4.167-2000, ПНД Ф 14.1:2.4.157-99) и свинец в воде и почве (РД 52.18.289-90, ПНД Ф 14.1:2.4.139-98) определяли методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-105М» (Россия). В почве подвижные формы фосфора и калия определяли по Чирикову (ГОСТ 26204-91), аммонийный и нитратный азот — с использованием фотометрии, по методу ЦИНАО (ГОСТ 26489-85). Содержание цинка в почве и воде определяли на приборе Liberty II (США), используя метод оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES). Для исследуемого образца результат однократного измерения по указанному выше методу представлен измеренным значением и его погрешностью. В проведенных исследованиях использованы прямые и косвенные измерения (согласно РМГ-29-2013). Для измерения температуры почвы и объема стекающей с почвы воды использовано однократное прямое измерение. Остальные измерения относят к косвенным.

При повторных измерениях получены выборки измеренных значений. В таких случаях за результат измерения (измеренное значение и его абсолютную погрешность) принято среднее арифметическое и стандартное отклонение выборки. Для косвенных измерений использован метод приведения к многократным прямым измерениям. При проведении измерений и статистической обработке использованы следующие национальные стандарты: Р 50.2.038-2004 Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений; ГОСТ Р 8.736-2011 Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения; МИ 2083-90 ГСИ Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей; ПМГ 96-2009 Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления.

**Результаты и обсуждение.** Данные, характеризующие условия проведенных экспериментов с помощью портативной лабораторно-полевой дождевальной установки с биогенными веществами при разной температуре почвы представлены в таблице 1. Из этих данных следует: 1) для обоих вариантов в пределах погрешности плотность и влажность почвы одинаковые; 2) значения характеристик дождя близкие; 3) температура почвы для варианта 1–2 в 10 раз больше, чем для варианта 1–1.

Таблица 1. Характеристики состояния почвы и искусственного дождя в эксперименте с биогенными веществами  
Table 1. Characteristics of soil condition and simulated rain in the biogenic substances experiment

Вариант	Почва			$l$ , мм/мин	$t_{\text{rain}}$ , мин	$t_{\text{cr}}$ , мин
	$T$ , °C	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\gamma$ , %			
1–1	$2,0 \pm 0,5$	$1,11 \pm 0,02$	$17,2 \pm 0,2$	$1,65 \pm 0,03$	22,0	2,0
1–2	$20,0 \pm 0,5$	$1,14 \pm 0,01$	$17,1 \pm 0,1$	$1,70 \pm 0,03$	22,7	2,7

Примечание:  $\pm$  — абсолютная погрешность;  $T$  — температура;  $\rho$  — плотность почвы;  $\gamma$  — влажность почвы;  $l$  — интенсивность дождя;  $t_{\text{rain}}$  — продолжительность дождя;  $t_{\text{cr}}$  — время до начала стока.



Таблица 2. Концентрации биогенных веществ в почве и в дождевой и стекающей воде  
Table 2. Concentrations of biogenic substances in soil and rain and runoff water

Вариант	Ион	$C_{\text{soil}}$ , мг/кг	$C_{\text{rain}}$ , мг/л	$C_{\text{run}}$ , мг/л	$dC = C_{\text{run}} - C_{\text{rain}}$ , мг/л
1-1	$\text{NH}_4^+$	6,8±1,0	0	1,11±0,22	1,11±0,22 (20)
	$\text{NO}_3^-$	8,3±1,3	0,38±0,11	2,96±0,59	2,58±0,70 (27)
	$\text{K}_2\text{O}^+$	31,0±4,7	0,67±0,13	2,45±0,34	1,78±0,47 (26)
	$\text{P}_2\text{O}_5^{3-}$	31,2±4,7	0	1,95±0,39	1,95±0,39 (20)
1-2	$\text{NH}_4^+$	6,21±0,93	0	1,66±0,33	1,66±0,33 (20)
	$\text{NO}_3^-$	7,4±1,1	0,38±0,11	4,19±0,84	3,81±0,95 (25)
	$\text{K}_2\text{O}^+$	30,4±4,6	0,67±0,13	2,05±0,29	1,38±0,42 (30)
	$\text{P}_2\text{O}_5^{3-}$	31,1±4,7	0	1,75±0,35	1,75±0,35 (20)

Примечание: ( ) — относительная погрешность, %.

Таблица 3. Характеристики состояния почвы и искусственного дождя в эксперименте с тяжелыми металлами  
Table 3. Characteristics of soil condition and simulated rain in the heavy metals experiment

Вариант	Ион	Почва			$l$ , мм/мин	$t_{\text{rain}}$ , мин	$t_{\text{cr}}$ , мин
		$T$ , °C	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\nu$ , %			
2-1	$\text{Pb}^{2+}$	20,0±0,5	1,14±0,02	17,4±0,1	1,72±0,04	22,8	2,8
2-2	$\text{Zn}^{2+}$	1,0±0,5	1,21±0,03	15,0±0,2	1,08±0,03	16,5	1,5
2-3	$\text{Zn}^{2+}$	17,0±0,5	—	27,0±0,2	1,70±0,02	15,2	0,2

Примечание: «—» — обозначает отсутствие измерений.

Таблица 4. Концентрации свинца и цинка в почве, в дождевой и стекающей воде  
Table 4. Lead and zinc concentrations in soil, rain and runoff water

Вариант	Ион	$C_{\text{soil}}$ , мг/кг	$C_{\text{rain}}$ , мг/л	$C_{\text{run}}$ , мг/л	$dC = C_{\text{run}} - C_{\text{rain}}$ , мг/л
2-1	$\text{Pb}^{2+}$	173±42	0	0,061±0,015	0,061±0,015 (25)
2-2	$\text{Zn}^{2+}$	30,7±2,7	0,0643±0,0023	0,0137±0,0048	-0,0506±0,0071 (14)
2-3	$\text{Zn}^{2+}$	30,7±2,7	0,0635±0,0027	0,0215±0,0060	-0,0420±0,0087 (21)

Примечание: ( ) — относительная погрешность, %.

В таблице 2 представлены данные измеренных значений концентрации биогенных веществ в почве и в дождевой и стекающей воде. Из этих данных следует: 1) все значения концентраций достоверные; 2) все значения  $dC > 0$  (почва теряет биогенные вещества); 3) для всех биогенных веществ значения  $dC$  для разных температур одинаковые (с учетом пределов погрешности). Вывод: в интервале температур от 2 до 20°C значение  $dC$  в пределах погрешности можно принять постоянной величиной, не зависящей от температуры почвы. Это упрощает проведение экспериментальных исследований и разработку методов расчета потерь из почвы биогенных веществ.

В таблице 3 представлены данные, характеризующие условия проведенных экспериментов с тяжелыми металлами. Из этих данных следует: 1) для свинца дождевание проведено при одной температуре 20,0±0,5°C; 2) для цинка в обоих вариантах характеристики почвы и дождя разные (в варианте 2-3 использован почвенный образец из варианта 2-2 после его дождевания, температура почвы в варианте 2-3 в 17 раз больше, чем в варианте 2-2).

В таблице 4 представлены данные измеренных значений концентрации тяжелых металлов в почве и в дождевой и стекающей воде. Из этих данных следует: 1) для свинца все значения концентраций достоверные, а  $dC > 0$ , то есть почва теряет свинец; 2) для цинка все значения концентраций достоверные, а  $dC < 0$  (почва получила цинк из дождевой воды); 3) в пределах погрешности измерений получение почвой цинка ( $dC$ ) можно принять постоянной величиной (не зависящей от температуры почвы). Вывод: для цинка величина  $dC$  является устой-

чивой по отношению к температуре и влажности почвы, а также к интенсивности дождя и к повторному его выпадению. Эта устойчивость также упрощает проведение экспериментальных исследований и разработку методов расчета массообмена цинком между почвой и поверхностным потоком воды.

Для любого естественного дождя метод расчета массообмена растворенным веществом определяется уравнением (1) и величинами  $dC$  и  $h$ . Используя метод дождевания, сначала можно определить слой стока  $h$  [16], затем для этого слоя стока определить разность концентраций исследуемого вещества  $dC$ . Далее по уравнению (1) можно рассчитать количество вещества  $m$ , которое почва теряет или получает. Для загрязнения поверхностных водных объектов рассматриваются только случаи, когда почва теряет загрязняющее вещество ( $dC > 0$ ).

**Заключение.** С использованием метода дождевания проведены экспериментальные исследования массообмена растворенных веществ в системе почва — дождевой поток воды. Теория массообмена допускает, что почва может как терять вещества, так и получать их из дождевой воды. Проведенный эксперимент подтвердил это. Почва теряет биогенные вещества и свинец, а цинк получала из дождевой воды. Также установлено, что, в пределах погрешности измерения, вынос из почвы биогенных веществ и получение почвой цинка не зависят от температуры почвы. Эксперименты проведены при двух разных температурах почвы: для биогенных веществ — 2 и 20°C, для цинка — 1 и 17°C. Слабая зависимость от температуры упрощает экспериментальные исследования

и разработку нормативов для расчетных методов. При разработке нормативов необходимо учитывать не только содержание в почве исследуемых растворенных веществ, но и их содержание в дождевой воде.

Полученные экспериментальные данные можно использовать для расчетов выноса из почвы исследуемых веществ в отношении естественных дождей. При отсутствии натурных наблюдений за выпадающими на почву дождями метод дождевания является единственным методом для экспериментальных исследований почвы как диффузного источника загрязнения поверхностных водных объектов. В этом случае учитываются только события, когда почва теряет загрязняющее вещество.

**Список источников**

- Italy, Rome (2015). *Status of the world's soil resources (SWSR) — main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Italy, Rome, 650 p. Available at: <http://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf> (accessed: 30.01.2022).
- Михайлушкин П.В., Алиева А.Р. Органическое земледелие — направление перехода к «зеленой» экономике в России // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2020. № 2 (374). С. 17-19. doi: 10.24411/2587-6740-2020-12022
- Rodriguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., Pennock, D. (2018). *Soil pollution: a hidden reality*, Rome, Italy, 142 p. Available at: <http://www.fao.org/3/i9183en/i9183en.pdf> (accessed: 01.03.2022).
- Неведров Н.П., Проценко Е.П., Балабина И.П., Кочуров Б.И., Куликова Е.В. Ресурсный подход к оценке загрязнения почв тяжелыми металлами и изучению емкости геохимических барьеров на примере города Курска //





Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 28-34. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-028-034

5. Дубовик Д.В., Дубовик Е.В. Тяжелые металлы в склоновом агроландшафте. Курск: ФГБНУ ВНИИЗиЗПЭ, 2016. 170 с.

6. Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование / под ред. чл.-кор. РАН Н.И. Санжаровой, к.б.н. П.Н. Цынгвинцева. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2019. 398 с.

7. Михайлов С.А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели: Аналитический обзор. Барнаул: День, 2000. 130 с.

8. Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Современные изменения выноса биогенных веществ в реки бассейна Волги на юге лесной зоны // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2019. № 5. С. 43-55. doi: 10.31857/S2587-55662019543-55

9. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор — водоток — водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 248 с.

10. Zingg, A.W. (1940). Degree and length of land slopes as it affects soil loss in runoff. *Agricultural Engineering*, vol. 21 (2), pp. 59-64.

11. Norton, L.D., Savabi, R. (2010). Evolution of a linear variable intensity rainfall simulator for surface hydrology and erosion studies. *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 26, pp. 239-245.

12. Mahmoodabadi, M., Sajjadi, S.A. (2016). Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion. *Geomorphology*, vol. 253, no. 1, pp. 159-167. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.10.010

13. Sobol, N.V., Gabbasova, I.M., Komissarov, M.A. (2017). Effect of rainfall intensity and slope steepness on the development of soil erosion in the Southern Cis-Ural Region (a model experiment). *Eurasian Soil Science*, vol. 50, no. 9, pp.1098-1104. doi: 10.1134/S106422931709006X

14. Minea, G., Ioana-Toroimac, G. (2016). Land use impact on overland flow: micro-scale field experimental analysis. *Journal of Water and Land Development*, vol. 29, no. 1, pp. 67-74. doi: 10.1515/jwld-2016-0013

15. Saber, A.N., Somjunyakul, P., Ok, J., Watanabe, H. (2019). Rainfall-runoff simulation of radioactive cesium transport by using a small-scale portable rainfall simulator. *Water Air Soil Pollution*, vol. 226, pp. 230-245. doi: 10.1007/s11270-019-4268-9

16. Sukhanovskii, Yu.P., Ollesh, G., Khan, K.Y., Meisner, R. (2002). A new index for rainfall erosivity on a physical basis. *Plant Nutrition Soil Science*, vol. 165, pp. 51-57.

17. Sukhanovskij, Y.P., Vitovtov, V.A., Prushchik, A.V., Solov'eva, Y.A., Sanzharova, S.I. (2015). Assessment of soil infiltration capacity by using portable rainfall simulator. *Dokuchaev Soil Bulletin*, vol. 78, pp. 26-35.

18. Rahmati, M., Weihermuller, L., Vanderborght, J. et al. (2018). Development and analysis of the soil water infiltration global database. *Earth System Science Data*, vol. 10, pp. 1237-1263.

19. Сухановский Ю.П., Вытовтов В.А., Соловьева Ю.А., Прущик А.В., Санжарова С.И., Титов А.Г. Методика определения потерь из почвы биогенных веществ с использованием портативной дождевальной установки // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30. № 6. С. 68-71.

## References

1. Italy, Rome (2015). *Status of the world's soil resources (SWSR) — main report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Italy, Rome, 650 p. Available at: <http://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf> (accessed: 30.01.2022).

2. Mikhailushkin, P.V., Alieva, A.R. (2020). Organicheskoe zemledelie — napravlenie perekhoda k «zelenoi» ehkonomike v Rossii [Organic agriculture — direction of transition to the “green” economy in Russia]. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal* [International agricultural journal], no. 2 (374), pp. 17-19. doi: 10.24411/2587-6740-2020-12022

3. Rodriguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., Pennock, D. (2018). *Soil pollution: a hidden reality*, Rome, Italy, 142 p. Available at: <http://www.fao.org/3/i9183en/i9183en.pdf> (accessed: 01.03.2022).

4. Nevedrov, N.P., Protsenko, E.P., Balabina, I.P., Kochurov, B.I., Kulikova, E.V. (2020). Resursnyi podkhod k otsenke zagryazneniya pochv tyazhelyimi metallami i izucheniyu emkosti geokhicheskikh bar'еров na primere goroda Kurska [Resource approach to assessment of heavy metal pollution of soils and studying the capacity of geochemical barriers on the example of Kursk City]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ehkologiya* [Theoretical and applied ecology], no. 1, pp. 28-38. doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-028-034

5. Dubovik, D.V., Dubovik, E.V. (2016). *Tyazhelye metally v sklonovom agrolandshafte* [Heavy metals in the slope agrolandscape]. Kursk, FGBNU VNIIZiZPE, 170 p.

6. Sanzharova, N.I., Tsyngvintsev, P.N. (ed.) (2019). *Tyazhelye metally v agrotsenozakh: migratsiya, deistvie, normirovanie* [Heavy metals in acrocyenoses: migration, effect, regulation]. Obninsk, RIRAE, 398 p.

7. Mikhailov, S.A. (2000). *Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ehkositsem. Metody otsenki i matematicheskie modeli: Analiticheskii obzor* [Diffusion pollution of ecosystems. Valuation methods and mathematical models: Analysis Series]. Barnaul, Den' Publ., 130 p.

8. Dolgov, S.V., Koronkech, N.I. (2019). Sovremennye izmeneniya vynosa biogennykh veshchestv v reki basseina Volgi na yuge lesnoi zony [Modern changes of nutrients removal into the southern forest zone rivers of Volga basin]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geo-*

*graficheskaya* [News of the Russian Academy of Sciences. Geographic series], no. 5, pp. 43-55. doi: 10.31857/S2587-55662019543-55

9. Kondrat'ev, S.A., Shmakova, M.V. (2019). *Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v sisteme vodosbor — vodotok — vodoe* [Mathematical modeling of mass transfer in the system: catchment area — watercourse — water body]. Saint-Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 248 p.

10. Zingg, A.W. (1940). Degree and length of land slopes as it affects soil loss in runoff. *Agricultural Engineering*, vol. 21 (2), pp. 59-64.

11. Norton, L.D., Savabi, R. (2010). Evolution of a linear variable intensity rainfall simulator for surface hydrology and erosion studies. *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 26, pp. 239-245.

12. Mahmoodabadi, M., Sajjadi, S.A. (2016). Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion. *Geomorphology*, vol. 253, no. 1, pp. 159-167. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.10.010

13. Sobol, N.V., Gabbasova, I.M., Komissarov, M.A. (2017). Effect of rainfall intensity and slope steepness on the development of soil erosion in the Southern Cis-Ural Region (a model experiment). *Eurasian Soil Science*, vol. 50, no. 9, pp.1098-1104. doi: 10.1134/S106422931709006X

14. Minea, G., Ioana-Toroimac, G. (2016). Land use impact on overland flow: micro-scale field experimental analysis. *Journal of Water and Land Development*, vol. 29, no. 1, pp. 67-74. doi: 10.1515/jwld-2016-0013

15. Saber, A.N., Somjunyakul, P., Ok, J., Watanabe, H. (2019). Rainfall-runoff simulation of radioactive cesium transport by using a small-scale portable rainfall simulator. *Water Air Soil Pollution*, vol. 226, pp. 230-245. doi: 10.1007/s11270-019-4268-9

16. Sukhanovskii, Yu.P., Ollesh, G., Khan, K.Y., Meisner, R. (2002). A new index for rainfall erosivity on a physical basis. *Plant Nutrition Soil Science*, vol. 165, pp. 51-57.

17. Sukhanovskij, Y.P., Vitovtov, V.A., Prushchik, A.V., Solov'eva, Y.A., Sanzharova, S.I. (2015). Assessment of soil infiltration capacity by using portable rainfall simulator. *Dokuchaev Soil Bulletin*, vol. 78, pp. 26-35.

18. Rahmati, M., Weihermuller, L., Vanderborght, J. et al. (2018). Development and analysis of the soil water infiltration global database. *Earth System Science Data*, vol. 10, pp. 1237-1263.

19. Sukhanovskii, Yu.P., Vitovtov, V.A., Solov'eva, Yu.A., Prushchik, A.V., Sanzharova, S.I., Titov, A.G. (2016). Metodika opredeleniya poter' iz pochvy biogennykh veshchestv s ispol'zovaniem portativnoi dozhdieval'noi ustanovki [Methodology for determining soil losses of biogenic substances using a portable rainfall simulator]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of science and technology of the AIC], vol. 30, no. 6, pp. 68-71.

## Информация об авторах:

**Сухановский Юрий Петрович**, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования и защиты почв от эрозии, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1782-501X>, soil-er@kursknet.ru

**Прущик Анастасия Викторовна**, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования и защиты почв от эрозии, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9010-5548>, model-erosion@mail.ru

**Вытовтов Владимир Алексеевич**, старший научный сотрудник лаборатории моделирования и защиты почв от эрозии, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3098-5053>, v.a.vitovtov@mail.ru

**Титов Александр Григорьевич**, научный сотрудник лаборатории моделирования и защиты почв от эрозии, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3110-5481>, titov\_a\_g@mail.ru

## Information about the authors:

**Yurii P. Sukhanovskii**, doctor of agricultural sciences, leading researcher of the laboratory of modelling and soil erosion protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1782-501X>, soil-er@kursknet.ru

**Anastasia V. Prushchik**, candidate of agricultural sciences, senior researcher of the laboratory of modelling and soil erosion protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9010-5548>, model-erosion@mail.ru

**Vladimir A. Vitovtov**, senior researcher of the laboratory of modelling and soil erosion protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3098-5053>, v.a.vitovtov@mail.ru

**Alexandr G. Titov**, researcher of the laboratory of modelling and soil erosion protection, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3110-5481>, titov\_a\_g@mail.ru