

ISSN 2070–4828

МЕЛИОРАЦИЯ

Научный журнал

№ 3(97)

Основан в 1951 году
Выходит 4 раза в год

Июль – сентябрь, 2021



Минск
2021

СВИДЕТЕЛЬСТВО № 411

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА:

Республиканское научное дочернее унитарное предприятие «Институт мелиорации»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. **А. П. Лихацевич**

РЕДКОЛЛЕГИЯ:

д-р с.-х. наук, проф. **А. С. Мееровский** (зам. гл. редактора)

акад. РАН, д-р с.-х. наук, проф. **Н. Н. Дубенок**

д-р с.-х. наук, проф. **Ю. А. Мажайский**

д-р техн. наук, проф. **Э. И. Михневич**

д-р с.-х. наук, проф. **Н. Н. Цыбулько**

д-р с.-х. наук, проф. **В. И. Желязко**

д-р с.-х. наук **П. Ф. Тиво**

канд. техн. наук, доцент **А. С. Анженков**

канд. с.-х. наук, доцент **А. Л. Бирюкович**

канд. техн. наук, доцент **Н. К. Вахонин**

канд. техн. наук **Э. Н. Шкутов**

Журнал рецензируется.

Журнал включен в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований.

*Журнал включен в Перечень научных изданий ВАК Российской Федерации для опубликования результатов диссертационных исследований (распоряжение Министерства образования и науки Российской Федерации от 12 февраля 2019 г. № 21-р) по следующим группам научных специальностей:
06.01.02 – мелиорация, рекультивация и охрана земель;
06.01.06 – луговое хозяйство и лекарственные эфирно-масличные культуры.*

Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Статьи и отдельные выдержки из журнала могут цитироваться при условии указания первоисточника.

Редакция не несет ответственности за возможные неточности по вине авторов.

Мнение редакции может не совпадать с мнением автора. Рукописи не возвращаются.

Фотоматериалы взяты из архива РУП «Институт мелиорации» и предоставлены авторами статей.

Журнал «МЕЛИОРАЦИЯ»

Подписной индекс: **74856** — для индивидуальных подписчиков,
748562 — для предприятий и организаций.

Подписку можно оформить во всех отделениях связи.

Редактор, корректор **Т. В. Мейкшане**

Компьютерная верстка **И. В. Скуратович**

Подписано к печати 31.08.2021 г. Формат 60x84 1/8.
Уч.-изд. л. 8,91. Усл. печ. л. 13,02. Заказ 341. Тираж 100 экз.

Адрес редакции: 220040, г. Минск, ул. Некрасова, 39-2;
тел. (017) 331-49-03;
e-mail: info@niimel.by, redaktor@niimel.by

Отпечатано РУП «Информационно-вычислительный центр Министерства финансов».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 2/41 от 29.01.2014.

Содержание Contents

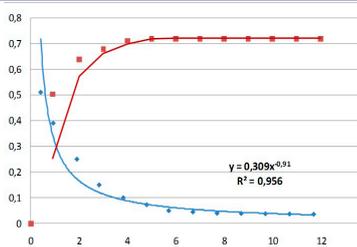
Мелиорация

Land improvement



А. С. Анженков, В. А. Болбышко, Н. Н. Погодин
Новые конструктивные решения насадок промывочных
A. S. Anzhenkov, V. A. Bolbyshko, N. N. Pogodin
New design solutions for flushing nozzles

5



А. И. Митрахович, И. Ч. Казьмирук
Влияние начальной влажности траншейной засыпки и срока эксплуатации на работоспособность дренажа
A. I. Mitrakhovich, I. Ch. Kazmiruk
Influence of the initial moisture of the trench filling and the service life on the operating capacity of the drainage

13



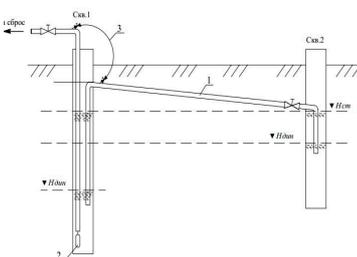
Л. С. Шкабаро
Разуплотнение подпахотного слоя почвы рыхлителем РП-45-140
L. S. Shkabaro
Decompaction of the underground soil layer with loosener RP-45-140

22



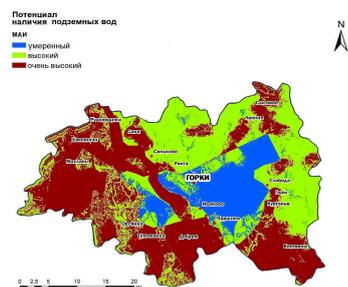
Н. Н. Линкевич
Оценка уровня безопасности и риска аварий гидротехнических сооружений
N. N. Linkevich
The assessing of the safety level and risk of accidents of hydraulic structures

28



А. И. Митрахович, А. П. Майорчик
Работоспособность сифонных водосборов на вертикальном дренаже
A. I. Mitrakhovich, A. P. Maiorchik
Siphon catchments operability on vertical drainage

43

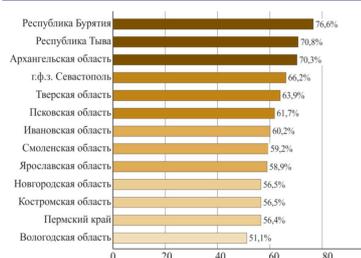


Т. Н. Мыслыва
Использование метода анализа иерархий и оценки факторов множественного влияния при прогнозировании потенциальных зон залегания подземных вод
T. N. Myslyva
Using analytical hierarchy process and multi-influencing factors in predicting groundwater potential zones

50

Использование мелиорированных земель

Usage of reclaimed lands



И. Г. Голубев, А. С. Апатенко, Н. С. Севрюгина

Состояние и перспективы вовлечения залежных земель в оборот

67

I. G. Golubev, A. S. Apatenko, N. S. Sevryugina

The state and prospects of involving the deposits in circulation



В. А. Волынцева, В. И. Бушуева

Режим орошения галеги восточной в условиях северо-восточной части Беларуси

75

V. A. Volyntseva, V. I. Bushuyeva

Irrigation regime of Galega orientalis Lam. in the North-eastern part of Belarus

Экология

Ecology



О. Н. Левшук, Т. Н. Мыслыва

Моделирование и прогнозирование пространственного распределения загрязнения тяжелыми металлами картофеля и овощей, выращиваемых на агроселитебных территориях

85

O. N. Levshuk, T. N. Myslyva

Modeling and forecasting the spatial distribution of heavy metals contamination of potatoes and vegetables cultivated in agrosettle territory



Д. В. Мелех

Разработка модели оценки летучих выбросов парниковых газов в Республике Беларусь

99

D. V. Melekh

Development of a model for assessing fugitive emissions of greenhouse gases in the Republic of Belarus

Чтобы помнили

To be remembered

Васса Федоровна Шебеко (к 105-летию)

105

Наши юбиляры

Our Jubilees

Диана Брониславовна Даутина (к 85-летию)

107

Петр Филиппович Тиво (к 80-летию)

108

МЕЛИОРАЦИЯ

УДК 631.3:626:862.91

НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ НАСАДОК ПРОМЫВОЧНЫХ

А. С. Анженков, кандидат технических наук

В. А. Болбышко, кандидат технических наук

Н. Н. Погодин, кандидат технических наук

РУП «Институт мелиорации», г. Минск, Беларусь

Аннотация

Выполнен расчет гидравлических параметров насадки промывочной в зависимости от напора и расхода в ней воды: скорости и силы струи воды, истекающей из насадки; количества и размера сопел насадки. Представлены новые конструктивные решения насадок промывочных, обеспечивающих повышение эффективности очистки дренажных трубопроводов. Приведены сравнительные характеристики параметров применяемой насадки промывочной и новых конструктивных решений.

Ключевые слова: насадки промывочные, устройство промывки дренажа, расход, скорость, сила удара струи воды.

Abstract

A. S. Anzhenkov, V. A. Bolbyshko, N. N. Pogodin

NEW DESIGN SOLUTIONS FOR FLUSHING NOZZLES

The hydraulic parameters of the flushing nozzle are determined depending on the pressure and flow rate of water: the speed and force of the stream of water flowing out of the nozzle; the number and size of the nozzle nozzles. New design solutions for flushing nozzles are presented, which increase the efficiency of cleaning drainage pipelines. Comparative characteristics of the parameters of the applied and new design solutions of flushing nozzles are given.

Keywords: flushing nozzles, drainage flushing device, flow rate, speed, water jet impact force.

Введение

В Республике Беларусь проектный водный режим почв на площади 2,2 млн га, что составляет более 70 % мелиорированных земель, обеспечивает закрытая дренажная сеть, которая включает 780 тыс. км регулирующей дренажной сети и 177 тыс. км проводящей коллекторной.

В процессе продолжительной эксплуатации наблюдается заиливание и заохривание внутренней полости дренажных труб, что приводит к снижению водоприемной и водопропускной способности дрен и, как следствие, переувлажнению мелиорированных земель. Для восстановления нормального функционирования дренажной сети осуществляется очистка внутренней полости дренажных труб

посредством различного оборудования, способов и технологий.

Наибольшее применение при очистке дренажных трубопроводов от заиливания и окристых соединений железа получил механизированный гидродинамический способ с использованием дренопромывочных установок. Сущность способа заключается в размыве отложений и их транспортировке из трубопровода посредством воздействия высокоскоростных струй воды, исходящих из промывочной насадки. В Республике Беларусь данный способ реализован при очистке дренажа установкой УПД-120, которая серийно выпускается с 2005 г. на Пинском заводе средств малой механизации. Однако следует отметить относитель-

но низкую производительность очистки, которая обуславливает значительную стоимость работ, составляющую порядка 2,4 тыс. руб. при очистке 1,0 км дренажного трубопровода.

Результаты исследований и их обсуждение

Определяющим фактором, характеризующим работу дренажно-промывочной установки, являются параметры насадки промывочной: скорость струи, ее расход, сила удара, количество и направление струй. Очевидно, что чем выше сила удара струи, тем больше эффективность размыва отложений в коллекторе. Известно, что для размыва грунта струей воды необходимо, чтобы скорость струи составляла не менее 10–12 м/с для песчаных грунтов, 20–25 м/с для супесей и суглинков и 30–35 м/с для средних и тяжелых глин [1]. В отложениях дренажных трубопроводов в основном находятся частицы грунта с крупностью 0,005–0,25 мм, что соответствует пылеватым илистым грунтам, а также тонким и мелким песком. Для размыва таких отложений необходимы скорость струи 20–35 м/с и создание определенного давления в насадке промывочной. Скорость струи в зависимости от давления определяется по следующей формуле [2]:

$$V = \varphi \sqrt{2gH}, \tag{1}$$

где V – скорость струи, м/с,
 φ – коэффициент скорости;
 H – напор, м вод. ст.
 g – ускорение свободного падения, м/с².

Коэффициент скорости φ зависит от коэффициента сопротивления и равен:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_c}}, \tag{2}$$

К основным направлениям, позволяющим повысить эффективность очистных работ, следует отнести совершенствование конструкции и параметров насадок промывочных.

где ξ_c – коэффициент сопротивления сужению потока.

Коэффициент сопротивления сужению потока, в свою очередь, определяется по следующей формуле [3]:

$$\xi_c = 0,51 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right), \tag{3}$$

где $\frac{\omega_2}{\omega_1}$ – соотношение площадей потока после сужения и до него.

Площадь поперечного сечения потока после сужения ω_2 следует принимать как сумму площадей всех выходящих отверстий насадки промывочной.

Сила струи F определяется по формуле [4]:

$$F = \rho q V, \tag{4}$$

где F – сила струи, Н;
 ρ – плотность жидкости, кг/м³;
 q – расход из одного отверстия, м³/с;
 V – скорость струй, м/с.

В свою очередь, расход из одного отверстия определяется согласно следующей зависимости:

$$q = \frac{Q}{n}, \tag{5}$$

где Q – общий расход, л/с;
 n – число отверстий насадки.

В табл. 1 приведена скорость струи и сила струи в зависимости от напора воды в насадке промывочной при расходах 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 л/с и числе отверстий насадки $n = 7$.

Таблица 1. Скорость и сила струи воды при выходе из насадки промывочной в зависимости от напора и расхода воды

Показатели	Напор, м вод. ст.					
	20	40	60	80	100	120
Скорость струи, м/с	16,5	23,2	28,4	32,6	36,5	39,7
Сила струи (Н) при Q = 0,5 л/с	1,2	1,6	2,0	2,3	2,6	2,8
Q = 1,0 л/с	2,3	3,3	4,0	4,6	5,2	5,7
Q = 1,5 л/с	3,5	4,9	6,0	7,0	7,8	8,5
Q = 2,0 л/с	4,7	6,6	8,1	9,3	10,4	11,4

Зависимости скорости и силы струи от напора и расхода приведены на рис. 1 и 2.

Зная расход и скорость струи насадки и принимая количество отверстий равном n , можно определить диаметр d отверстий насадки по следующей зависимости:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi nV}}, \quad (6)$$

где Q – общий расход, м³/с,
 n – число отверстий насадки,
 V – скорость струи, м/с.

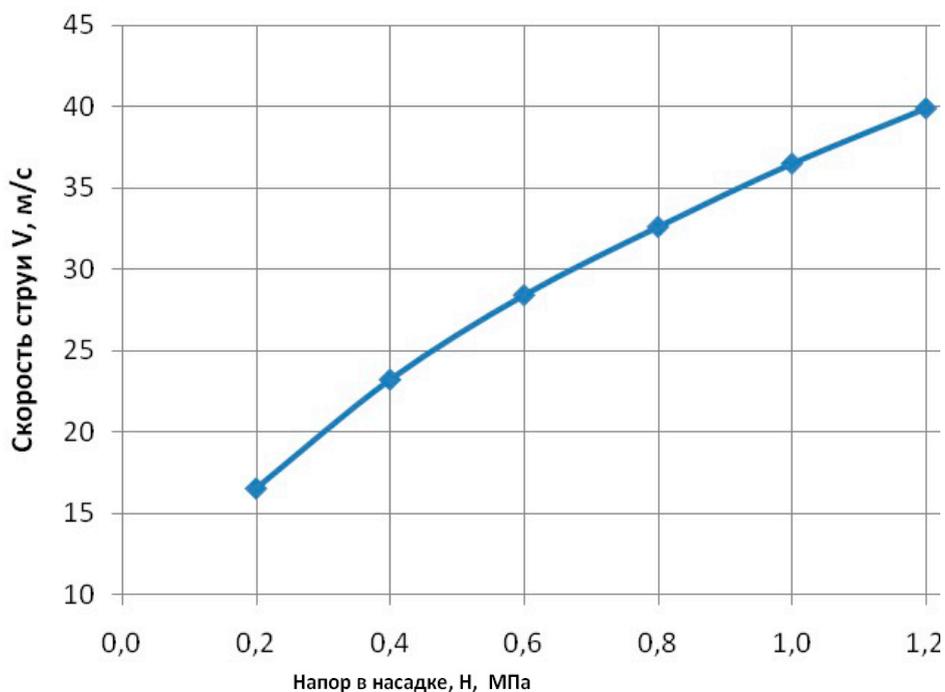


Рис. 1. Скорость струй воды в насадке в зависимости от напора

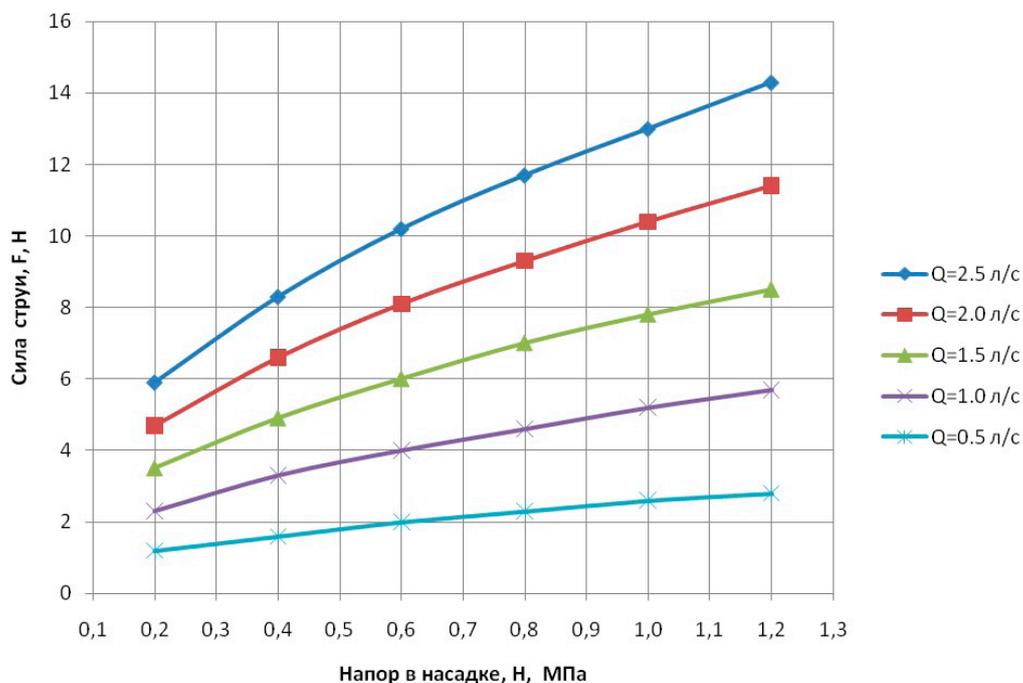


Рис. 2. Сила струи в насадке промывочной в зависимости от напора и расхода воды

На установке промывки дренажа УПД-120 установлен мембранный насос с давлением 5,0 МПа, который обеспечивает расход воды до 120 л/мин. Установка комплектуется промывочным рукавом диаметром 15 мм и длиной 300 м, а также насадкой промывочной, параметры которой приведены на рис. 3.

При гидродинамическом способе очистки основной объем размытых отложений выносятся из коллектора при извлечении промывочного рукава с насадкой. Однако часть наилка остается в коллекторе после прохода промывочной насадки. Это снижает эффективность очистки и требует большого количества проходов. Поэтому весьма актуален вопрос повышения воздействия на поток пульпы с целью более полного ее выноса из полости коллектора.

В связи с этим были проанализированы возможности повышения эффективности транспортировки размытых отложений и разработана новая конструкция насадки промывочной мягкой (НПМ) [5]. Основной особенностью данной насадки является возможность дополнительного механического воздействия на поток пульпы. Разработаны два типоразмера насадки промывочной НПМ-60 и НПМ-80 диаметром соответственно 60 и 80 мм. Отличие данных насадок – в размере резиновых манжет. Насадка НПМ-60 предназначена для очистки дренажных трубопроводов диаметром до 100 мм, а НПМ-80 – диаметром 100 мм и более. Конструкция и общий вид насадки приведены на рис. 4 и 5.

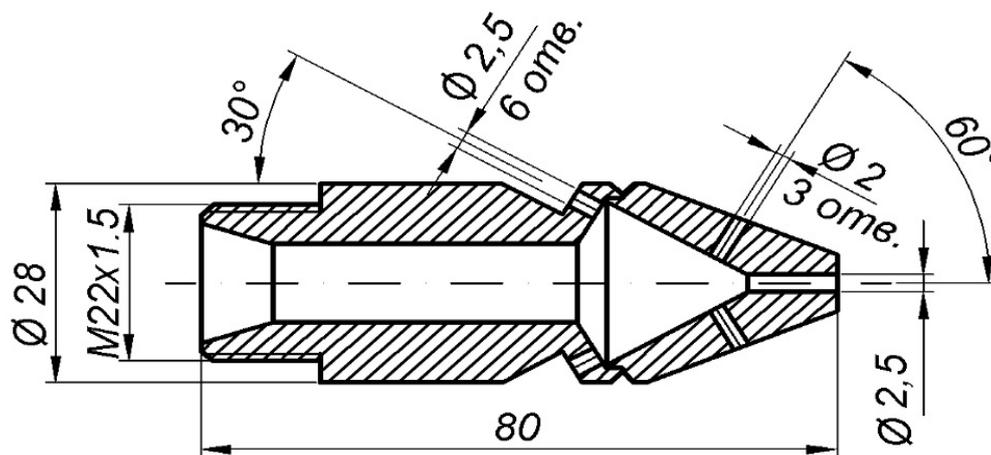


Рис. 3. Конструкция насадки промывочной, применяемой в устройстве промывки дренажа УПД-120

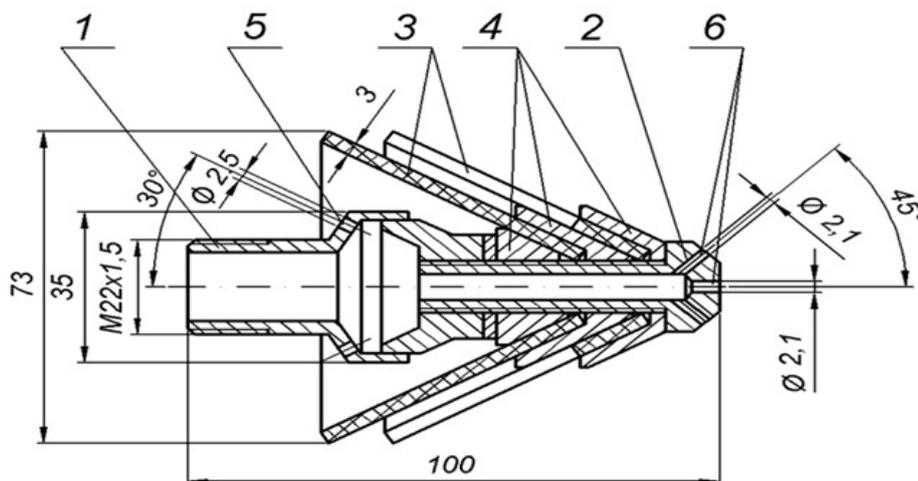


Рис. 4. Конструкция насадки промывочной мягкой (НПМ) (патент ВУ11880)

Данная насадка состоит из корпуса 1, стяжки 2, конусообразных разрезных резиновых манжет 3, прижимных шайб 4. На корпусе 1 и стяжке 2 выполнены задние и передние сопла 5 и 6.



Рис. 5. Общий вид насадки промывочной мягкой НПМ-80

В процессе размыва отложений струями воды, исходящих из фронтальных сопел при движении насадки вперед, манжеты изгибаются и не препятствуют ее продвижению по дренажному трубопроводу (рис. 6). Во время извлечения насадки исходящие из тыльных сопел струи воды дополнительно воздействуют на отложения, а отогнутые резиновые ман-

жеты, работая как скребок, транспортируют поток пульпы из дренажного трубопровода (рис. 7). Комплексное воздействие тыльных струй воды и отогнутых манжет на размываемые отложения при их извлечении из дренажного трубопровода существенно повышают объемную концентрацию пульпы и, соответственно, эффективность очистки.

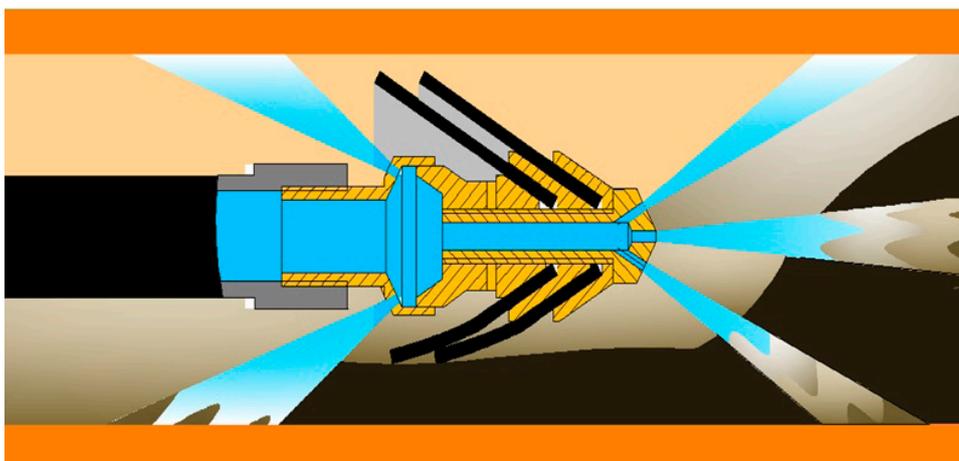


Рис. 6. Продвижение насадки промывочной по дренажному трубопроводу

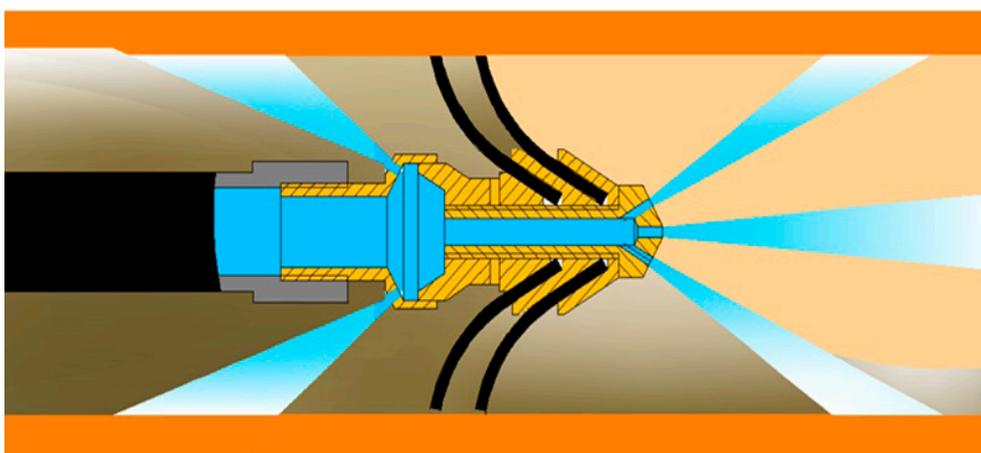


Рис. 7. Извлечение насадки промывочной из дренажного трубопровода

Основную работу по выносу отложений в процессе извлечения насадки выполняют тыльные струи, а направленные вперед работают при этом вхолостую, не оказывая существенного влияния на эффективность очистки. В целях направления всех струй назад при извлечении насадки и повышения очищающей способности была разработана новая конструкция реверсивной насадки промывочной мягкой (рис. 8 и 9) [6].

Реверсивная насадка промывочная мягкая состоит из корпуса 1, на котором с возможностью перемещения установлена втулка 2. На втулке 2 с помощью прижимных шайб 3 закреплены манжеты 4. Насадка содержит тыльные сопла 5, 6 и передние сопла 7, 8. Во втулке 2

выполнены отверстия для подвода воды 9 и 10.

При движении вперед, как показано на рис. 6 и 8, манжеты 4 взаимодействуют со стенками коллектора и находящимися в нем отложениями и перемещают втулку 2 назад. При этом открываются отверстия 9 в корпусе 1 и вода поступает к передним соплам 7 и 8. В это время отверстие 10 закрыто и вода к задним соплам 6 не поступает. Когда насадка извлекается из коллектора, как показано на рис. 7 и 9, манжеты 4 перемещают втулку 2 в переднее положение. При этом отверстие 9 перекрывается и прекращается доступ воды к передним соплам 7, 8, а отверстие 10 открывается, и вода поступает к задним соплам 6.

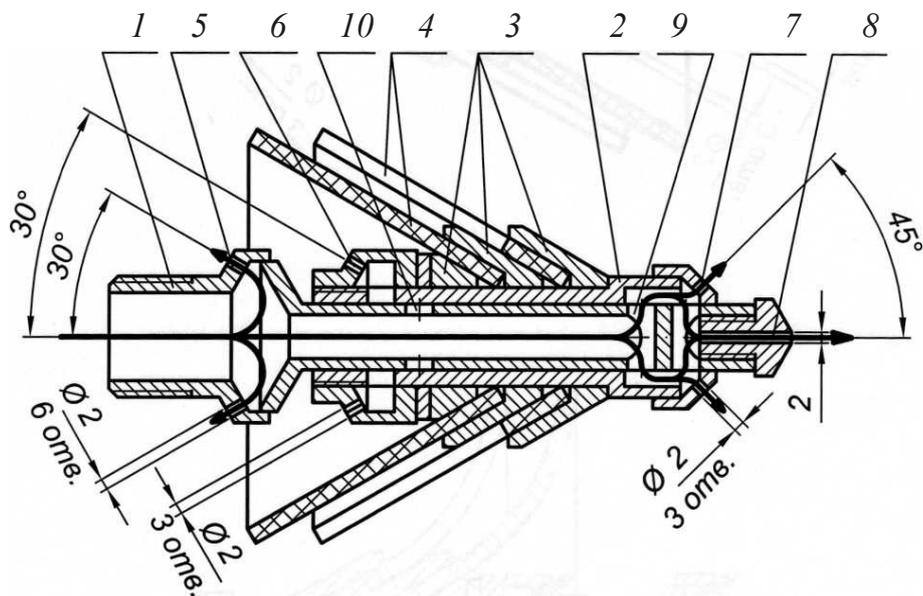


Рис. 8. Конструкция реверсивной насадки промывочной мягкой (РНПМ) при ее перемещении вперед по дренажному трубопроводу (патент ВУ 12455)

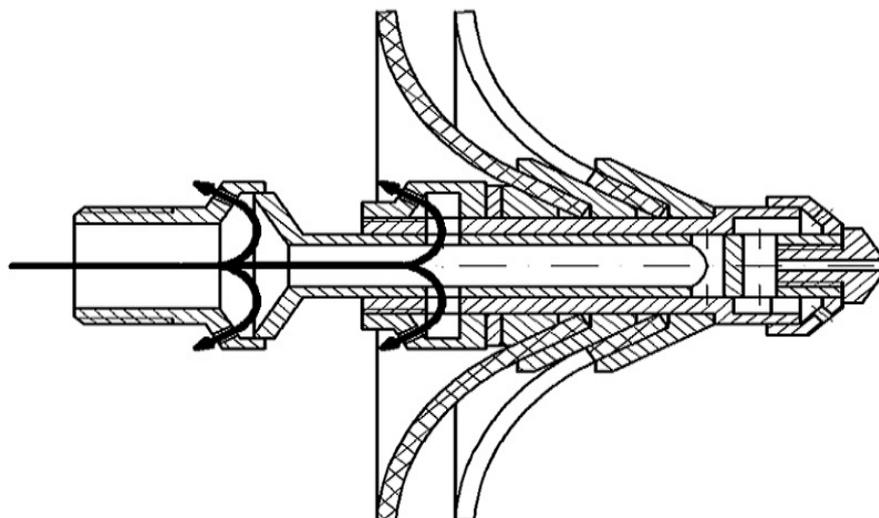


Рис. 9. Конструкция реверсивной насадки промывочной мягкой (РНПМ) при ее извлечении из дренажного трубопровода

При извлечении насадки весь расход воды истекает через тыльные сопла и совместно с манжетами обеспечивает вынос отложений из дренажного трубопровода. Применение такой насадки позволяет повысить эффективность очистки.

Разработано два типоразмера реверсивной насадки промывочной мягкой РНПМ-60 для очистки дренажных трубопроводов диаметром 75 мм и РНПМ-80 для трубопроводов диаметром 100 мм и выше.

С учетом проведенных исследований произведен расчет параметров установки промывки дренажа. При этом определено, что установку целесообразно комплектовать промывочным рукавом с внутренним диаметром 20 мм [7].

Сравнительные характеристики параметров установки промывки дренажа при использовании типовой и предложенных конструкций насадки промывочной приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительные характеристики параметров насадок промывочных

№ п/п	Показатели	Типовая конструкция насадки промывочной	Новые конструктивные решения насадок промывочных				
			Насадка промывочная мягкая (НПМ)		Реверсивная насадка промывочная мягкая (РНПМ)		
		Расположение сопел насадки					
		4 – передних 6 – тыльных	4 – передних 6 – тыльных	1 – передних 6 – тыльных	движение вперед	движение назад	
1	Давление насоса МПа, max	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
2	Расход насоса, л/с, max	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	
3	Длина промывочного рукава, м	300	300	300	300	300	
4	Внутренний диаметр промывочного рукава, мм	15	20	20	20	20	
5	Тыльные сопла насадки: – количество, шт. – диаметр, мм	6 2,5	6 2,5	6 2,8	6 2,0	6+6 2,0 и 3,0	
6	Передние сопла насадки: – количество, шт. – диаметр, мм	1+3 2,5 и 2,0	4 2,0	1 3,5	4 2,0	– –	
7	Потери давления в водопроводящих элементах промывочного устройства, МПа	4,75	4,03	4,12	3,52	4,48	
8	Давление в насадке, МПа	0,25	0,97	0,82	1,48	0,51	
9	Расход струй насадки, л/с, в том числе: передних сопел тыльных сопел	0,76 0,25 0,50	1,5 0,45 1,05	1,54 0,32 1,22	1,39 0,55 0,83	1,6 – 1,6	
10	Скорость струй насадки, м/с	18,1	35,8	33,0	44,1	26,1	
11	Сила передних струй, H	1,0	4,0	10,5	6,1	–	
12	Сила тыльных струй, H	1,6	6,3	6,7	6,1	2,1/4,8	

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что из-за больших потерь напора в промывочном рукаве диаметром 15 мм давление в промывочной насадке составляет всего 0,25 МПа, что приводит к относительно низкой скорости и силы струй, которые являются определяющими факторами, характеризующими работу насадки и устройства в целом.

Сравнивая характеристики новых конструктивных решений насадок и насадки, применяемой на установке промывки дренажа УПД-120, можно сделать вывод, что вариант с насадкой НПМ с 4 передними и 6 тыльными соплами и диаметром промывочного рукава 20 мм обеспечивает увеличение расхода и скорости струи почти в 2 раза, а силы струи – в 4 раза.

Заключение

1. Выполнен расчет гидравлических параметров насадки промывочной в зависимости от напора и расхода в ней воды: скорости и силы струи воды, исходящей из насадки; количества и размера сопел насадки. Это позволяет объективно принимать решения при ее конструировании.

2. Разработаны конструкции насадок промывочных (насадка промывочная мягкая НПМ и реверсивная насадка промывочная мягкая

Предварительные испытания насадки мягкой НПМ-80 в лабораторных и полевых условиях, а реверсивной насадки промывочной мягкой РНПМ-80 в лабораторных условиях показали повышение эффективности их применения по сравнению с типовой насадкой промывочной. При обратном проходе типовой насадки промывочной объемная концентрация извлекаемых размываемых песчаных отложений из дренажного трубопровода диаметром 100 мм и степенью его заиливания 30 % составляла 0,039–0,048, а при проходе насадок промывочных мягких 0,06–0,08, то есть объемная концентрация пульпы повысилась в 1,5–1,7 раза.

РНПМ), новизна которых подтверждена патентами.

3 Применение нового конструктивного решения насадок промывочных по сравнению с типовой насадкой, используемой на установке промывки дренажа УПД-120, позволяет повысить объемную концентрацию размываемых отложений (пульпы) при извлечении насадки в 1,5–1,7 раза.

Библиографический список

1. Строительные машины для механизации гидромелиоративных работ / В. В. Суриков [и др.]. – М. : Агропромиздат, 1985. – 215 с.
2. Киселев, П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 349 с.
3. Павловский, Н. Н. Краткий гидравлический справочник / Н. Н. Павловский. – Л.–М. : Госиздат, 1940. – 309 с.
4. Примеры расчетов по гидравлике / А. Д. Альтшуль [и др.]. – М. : Стройиздат, 1977. – 255 с.
5. Промывочная головка : пат. ВУ 11880 / В. А. Болбышко, Н. Н. Погодин. – Оpubл. 28.02.2019.
6. Промывочная насадка : пат. ВУ 12455 / А. С. Анженков, В. А. Болбышко, Н. Н. Погодин. – Оpubл. 30.12.2020.
7. Погодин, Н. Н. Расчет параметров технологического оборудования, используемого при гидродинамическом способе очистки дренажа / Н. Н. Погодин, А. С. Анженков, В. А. Болбышко // Мелиорация. – 2020. – № 2 (92). – С. 5–11.

Поступила 27 августа 2021 г.

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ТРАНШЕЙНОЙ ЗАСЫПКИ И СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ДРЕНАЖА

А. И. Митрахович¹, кандидат технических наук

И. Ч. Казмирук², кандидат технических наук

¹РУП «Институт мелиорации», г. Минск, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Аннотация

Проанализированы основные факторы, влияющие на эффективность работы дренажных систем, установлен характер изменения коэффициента фильтрации дренажной засыпки во времени. Приведено необходимое быстродействие дренажных систем для обеспечения требуемых норм осушения. Исследовано влияние начальной влажности дренажной засыпки на ее водопроницаемость. Сделан вывод о нецелесообразности строительства осушительно-увлажнительных систем при наличии в зоне подпочвенного увлажнения глинистых или суглинистых грунтов, которые при размокании образуют слабОВОПРОНИЦАЕМУЮ прослойку в траншейной засыпке.

Ключевые слова: дренажная система, геотекстиль, дренажный сток, почвогрунт, сельскохозяйственный дренаж, фильтрация.

Abstract

A. I. Mitrakhovich, I. Ch. Kazmiruk

INFLUENCE OF THE INITIAL MOISTURE OF THE TRENCH FILLING AND THE SERVICE LIFE ON THE OPERATING CAPACITY OF THE DRAINAGE.

The article analyzes the main factors affecting the efficiency of drainage systems, establishes the nature of the change in the filtration coefficient of the drainage backfill in time. The necessary performance of drainage systems is given to ensure the required drainage rates. The influence of the initial moisture content of the drainage backfill on its water permeability has been investigated. It is concluded that it is inexpedient to build drainage and humidification systems in the presence of clay or loamy soils in the zone of subsurface moisture, which, when soaked, form a weakly water-permeable layer in the trench backfill.

Keywords: drainage system, geotextile, drainage runoff, soil, agricultural drainage, filtration.

Введение

Эффективность работы дренажной системы зависит от многих факторов. В природно-климатических условиях Беларуси преимущественное значение имеют осушительные мелиорации. Подпочвенное увлажнение с помощью дренажа применяется редко – главным образом, из-за дефицита воды в открытых каналах в засушливый период. Увлажнение с помощью системы шлюзов возможно в основном при наличии гарантированного водного источника.

Эффективность работы дренажа можно конкретизировать его осушительным действием, то есть интенсивностью отвода избыточных вод с мелиорируемой территории. При этом ставится двойная задача по обеспечению:

благоприятного водного режима для произрастания сельскохозяйственных культур; необходимой несущей способности грунта для прохождения сельскохозяйственной тех-

ники в период сева, уборки урожая и проведения других технологических операций.

Это достигается снижением уровней грунтовых вод (УГВ) до определенных пределов. В первом случае это величина переменная и связана с изменчивостью требований растений к водному режиму в течение вегетационного периода. Для некоторых культур (озимых, многолетних трав) эти требования распространяются не только на летний сезон, но и на весь год. Во втором случае (обеспечение проходимости техники) данная величина относится, главным образом, к весеннему периоду, времени подготовки почвы и сева яровых культур. Внутри вегетационного периода первые и вторые требования в основном совпадают. Из технологии сельскохозяйственного производства на это время приходятся операции по подкормке растений и защите их от вредителей и болезней. Сложности в уборке урожая возникают только при затяжных осенних дождях.

Основные результаты

Определение эффективности работы дренажа

Эффективность дренажа определяется его возможностью создать и поддерживать на определенных глубинах уровень грунтовых вод для заданных периодов года.

Нормативами установлены следующие минимальные значения УГВ (нормы осушения) на торфяниках:

- для сенокосов в предпосевной период 35–40 см, в вегетационный – 60 см;
- пастбищ – 50 и 70 см соответственно;
- кормовых и овощных севооборотов – 50 и 80 см [1].

На легких минеральных землях в полевых севооборотах в предпосевной период УГВ должны быть не ближе 40 см от поверхности земли, а в вегетационный период – 70 см; на пастбищах – 50 и 70 см, а на сенокосах – 30 и 60 см. На кормовых севооборотах в пред-

севной период УГВ должны располагаться не ближе 40 см от поверхности земли, а в вегетационный период – не ближе 70 см.

Крайне важно нормативное быстрое действие систем, то есть время, за которое УГВ должны опускаться от поверхности земли до нормы осушения:

в весенний период для пашни и пастбища – 10 сут., а для сенокосов – 15 сут.;

в летне-осенний период это время определяется допустимыми сроками затопления поверхности и подтопления корнеобитаемого слоя дождевыми водами с собственного водосбора (табл. 1).

При этом дренажные системы должны отводить воду с расходом, определяемым обслуживаемой площадью и модулем дренажного стока. В свою очередь, модуль дренажного стока определяется объемом среднегодовых осадков, видом грунтов, уклоном поверхности, типом водного питания и пр.

Таблица 1. Нормативные сроки отвода избыточных вод с осушаемых территорий [1]

Вид культур	Сроки отвода избыточных вод, сут			
	с поверхности земли	на глубину		
		до 0,2 м	до 0,5 м	до нормы осушения
Полевые севообороты с озимыми	0,5	1	4	9
Полевые (без озимых), кормовые, овощные севообороты	0,8	2	5	10
Пастбища	1	2	5	10
Сенокосы	1,5	3	8	15

Как видно из таблицы, требования к мелиорации весьма жесткие: с поверхности земли избыточные воды должны быть удалены в течение 12, 19, 24 или 36 часов в зависимости от применяемого севооборота. Таким образом, главным показателем работоспособности дренажных систем выступает модуль дренажного стока. В табл. 2 [2] приведены нормативные значения этих величин для разных условий.

Модули стока увеличиваются на 10–15 % в случае дополнения материального дренажа кротовым, а при устройстве поглотителей поверхностного стока дренажный коллектор рассчитывают на суммарный сток: дренажный и поверхностный, отводимый поглотителями

в дренажную систему. Вопрос о влиянии фильтрующих засыпок, колонок-поглотителей, о продолжительности их эффективного функционирования остается открытым.

При обследовании дренажных систем, оценке их работоспособности большое значение имеет, кроме состояния сети дренажных труб, состояние обратной засыпки дренажных траншей, особенно при атмосферном типе водного питания.

Исследованиями В. С. Печениной [3] установлен характер изменения коэффициента фильтрации тяжелых суглинистых грунтов во времени под влиянием осушения (табл. 3).

Таблица 2. Модули дренажного стока [2]

Характеристика почвенного покрова и рельефа		Расчетный модуль дренажного стока, л/с*га, при средних годовых осадках, мм		
		до 600	600–700	более 700
Минеральные грунты				
1	Слабоводопроницаемые почвы – глины и тяжелые суглинки с содержанием частиц диаметром менее 0,01 мм более 50 %:			
	при уклоне поверхности более 0,01	0,4	0,5	0,6
	при уклоне поверхности менее 0,01	0,5	0,6	0,7
	в замкнутых котловинах между возвышенностями (западинный рельеф)	0,6	0,7	0,8
2	Средневодопроницаемые почвы – средние и легкие суглинки с содержанием частиц диаметром менее 0,01 мм от 30 до 50 %:			
	при уклоне поверхности более 0,01	0,5	0,6	0,7
	при уклоне поверхности менее 0,01	0,6	0,7	0,8
	в замкнутых котловинах между возвышенностями (западинный рельеф)	0,7	0,8	0,9
3	Хорошо водопроницаемые почвы – супеси, пески с содержанием частиц диаметром менее 0,01 мм до 30 %:			
	при уклоне поверхности более 0,01	0,6	0,7	0,8
	при уклоне поверхности менее 0,01	0,7	0,8	0,9
	в замкнутых котловинах между возвышенностями (западинный рельеф)	0,8	0,9	1,0
Торфяные грунты				
1	Материальный закрытый дренаж при атмосферном и безнапорном грунтовым питании	0,5	0,6	0,7
2	Материальный закрытый дренаж при напорном грунтовым питании	0,6	0,9	1,0
3	Для ловчих (контурных) дрен	0,8	0,9	1,0

Таблица 3. Изменение коэффициента фильтрации тяжелых суглинистых грунтов

Глубина слоя, см	Коэффициент фильтрации, м/сут.		
	в междренье		дренажной засыпки
	1959 г.	1972 г.	1972 г.
30	0,10	0,16	0,44
60	0,03	0,05	0,40
30	0,18	0,27	0,50
60	0,05	0,08	0,46

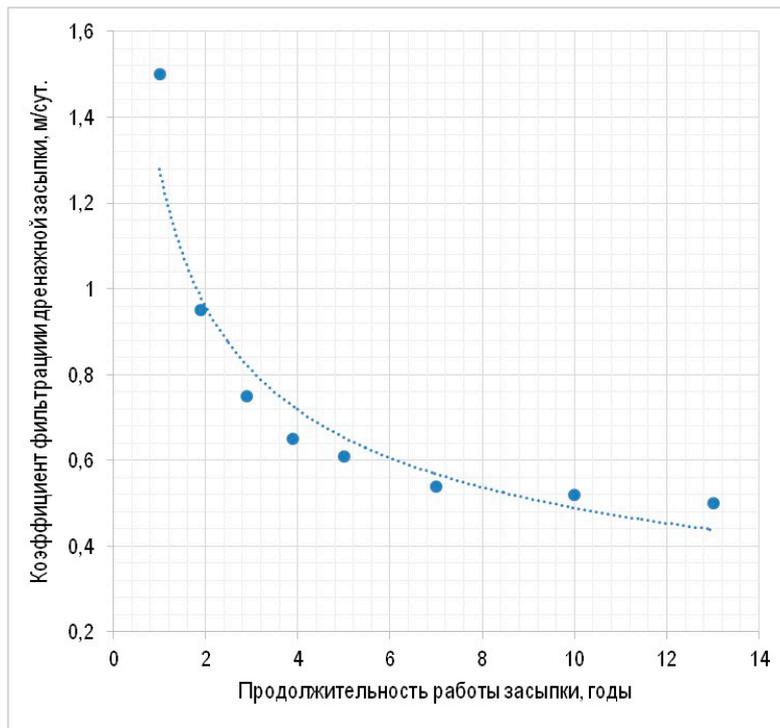


Рис 1. Изменение коэффициента фильтрации дренажной засыпки во времени [3]

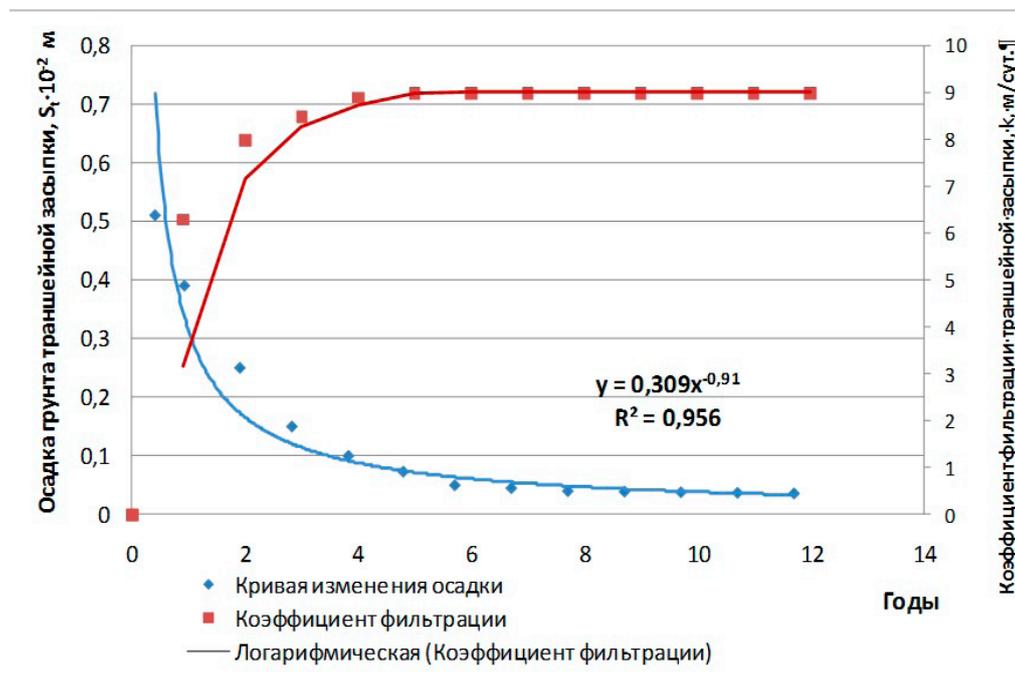


Рис. 2. Кривые изменения осадки и коэффициента фильтрации грунта траншейной засыпки во времени [4]

На рис. 1 изображена кривая изменения коэффициента фильтрации засыпки во времени. Как для всякого затухающего процесса, следует отметить экспоненциальный вид кривой.

Однако, несмотря на уменьшение со временем водопроницаемости дренажных засыпок, они и через 10–15 лет после строительства сохраняют ее в 5–8 раз большей, чем

грунт в междренье. Одновременно происходит некоторое увеличение водопроницаемости осушаемых почвогрунтов, используемых в земледелии.

Кривую снижения проницаемости траншейной засыпки, подобную изображенной на рис. 1, получил И. В. Войтович [4]. На основе полученной зависимости осадки грунта тран-

шейной засыпки во времени исследователем получена расчетная формула:

$$S_t = a_0 \gamma_r h^2 \left(1 - \frac{g}{\pi^3} \exp \left(- \frac{C_v \pi^2}{4h^2} t \right) \right),$$

где S_t – осадка грунта траншейной засыпки, м;
 a_0 – коэффициент относительной сжимаемости грунта;

γ_r – плотность грунта, кг/м³;

h – глубина траншеи, м;

t – время фильтрации, сут.;

C_v – коэффициент фильтрационной консолидации грунта

$$C_v = \frac{k(1 + \varepsilon)}{a\gamma},$$

где k – коэффициент фильтрации грунта, м/сут.;

ε – коэффициент пористости грунта;

$\gamma = 998$ кг/м³, плотность воды.

Установлена зависимость изменения водопроницаемости грунта траншейной засыпки во времени. Высокое значение коэффициента обратной корреляции ($= -0,9$) свидетельствует о тесной обратной связи осадки и водопроницаемости. Теоретически наиболее интенсивно (что, впрочем, подтверждено и опытами) водопроницаемость дренажной засыпки снижается в течение первых 2–3 лет эксплуатации, а затем стабилизируется, оставаясь все же в несколько раз более высокой, чем ненарушенный грунт в междренье.

Определенное положительное влияние на эффективность действия дренажа в суглинистых грунтах оказывает засыпка дренажным грунтом, что увеличивает модуль дренажного стока на 3–30 % [5].

Вопрос снижения водопроницаемости осушенных минеральных почвогрунтов приобрел в последнее время особую остроту в связи с использованием тяжелой сельскохозяйственной техники. Массивные сельскохозяйственные машины, проходя в течение сезона по 8–12 раз по полю, уплотняют почву, снижая ее водопроницаемость. В результате уплотнения машинами верхних слоев почвы наблюдается застой воды на поверхности при неинтенсивном дренажном стоке.

При исследовании влияния дренажной засыпки в работе дренажа необходимо обра-

щать внимание на ее влажность в момент засыпки траншей. Это относится, главным образом, к супесчаным, глинистым и суглинистым почвогрунтам, которые, размокая, создают зоны низкой водопроницаемости. В результате засыпки дренажных траншей переувлажненным грунтом происходит застой поверхностных вод: он в 2–4 раза более длителен, чем при достаточной водопроницаемости засыпки, и это снижает урожайность до 20 % [6].

Еще учеными ГДР предписывалось укладывать дренаж только в сухую погоду и в сухой грунт, а при невозможности обеспечить эти условия строительство следует отложить или прервать [7].

Влияние начальной влажности дренажной засыпки на ее водопроницаемость

Исследование влияния начальной влажности дренажной засыпки из лессовидных суглинков на ее водопроницаемость проводилось в грунтовом лотке и на приборе Дарси в гидротехнической лаборатории БГСХА. Испытывались пробы грунта при влажности 2, 5, 8, 12, 16 и 20 %. Продолжительность опытов – до 10 сут. Их результаты представлены на рис. 3: выявлена общая тенденция снижения водопроницаемости при увеличении начальной влажности дренажной засыпки [8].

Наибольшую пропускную способность имела дренажная засыпка, предварительно высушенная до 2%-го содержания в ней влаги. В начале опыта коэффициент фильтрации ее – 19,3 м/сут., в конце опыта – 12,0 м/сут. Снижение составило 37,8 %. При влажности 12 % коэффициент фильтрации в начале и конце опытов составил 4,4 и 3,2 м/сут., а снижение – 27,3 %. В опытах при влажности 16 % начальный коэффициент фильтрации 3,1 м/сут. составлял только 16 % от значений при влажности 2 %.

Наиболее четко выразилось снижение водопроницаемости в течение опытов при начальной влажности 20 %, которая снизилась с 2,3 м/сут. (12 % от значений Кф при влажности 2 %) до 0,2 м/сут., то есть на 91,3 %.

Увеличение начальной влажности дренажной засыпки более 20 % приводило к размоканию, разжижению грунта, превращению его в сметанообразную однородную массу с разрушением почвенных агрегатов.

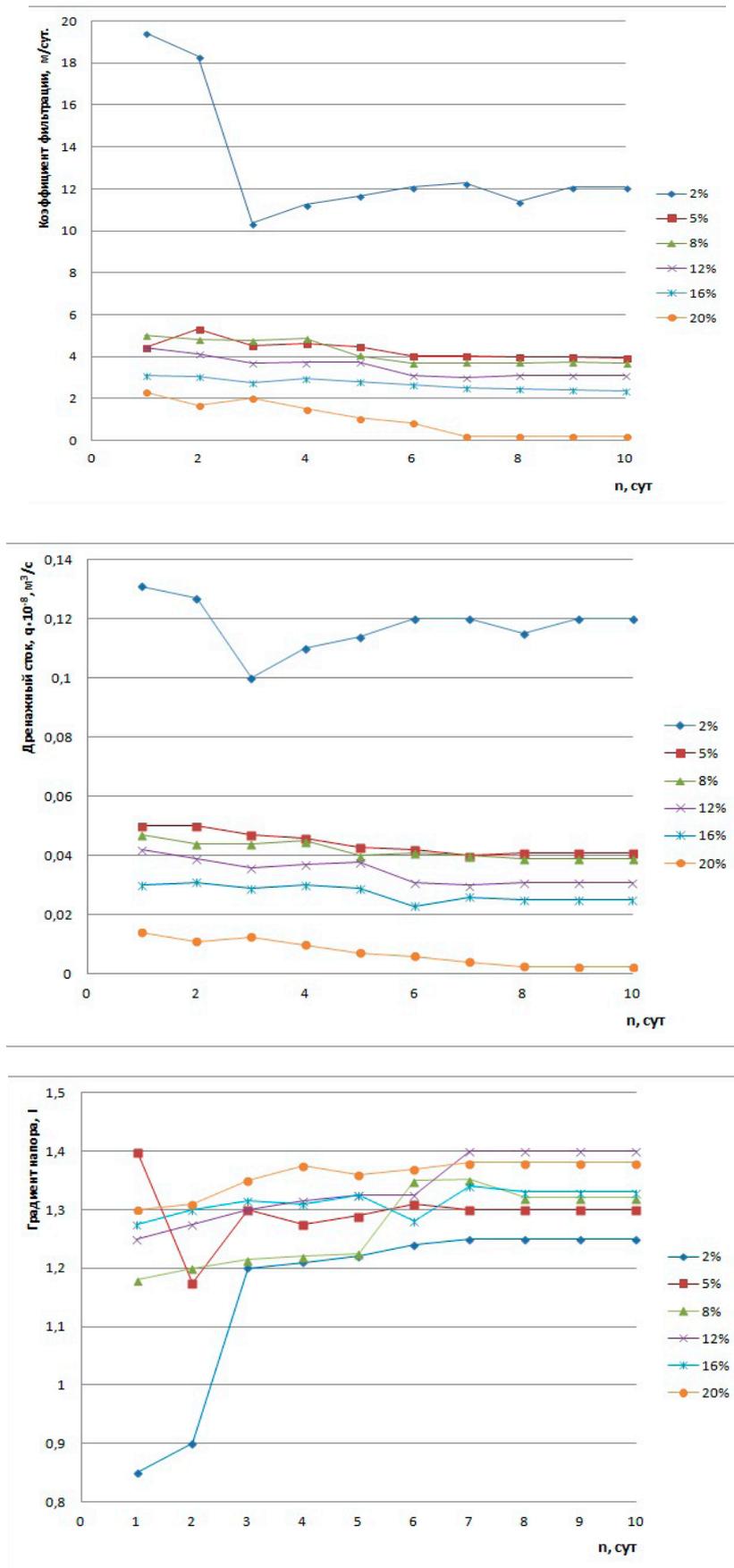


Рис. 3. Изменение проницаемости дренажной засыпки во времени при ее начальной влажности:

◆ 2% ■ 5% ▲ 8% ✕ 12% * 16% ● 20%

1 – коэффициент фильтрации, м/сут.; 2 – дренажный сток, $q \cdot 10^{-8}, \text{ м}^3/\text{с}$; 3 – градиент напора, l

Таким образом, лабораторные опыты подтвердили зависимость проницаемости дренажной засыпки от ее начальной влажности, с увеличением которой от 2 до 20 % проницаемость снижается в 58–60 раз. В то же время при начальной влажности засыпки 2 % и в конце опытов сохраняются достаточно высокие значения коэффициента фильтрации (12 м/сут.), которые более чем в три раза превосходят значения при начальной влажности 16 % и более чем в 8 раз по сравнению с начальной влажностью 20 %.

Если в течение опытов коэффициент фильтрации при начальной влажности 2 % снизился только в 1,6 раза, то при начальной влажности 20 % это снижение составило 11,4 раза.

Подобные выводы сделаны К. К. Сивицким, который установил, что в западинах из-за различной начальной влажности почвы максимальные модули дренажного стока при одинаковых глубинах затопления могут различаться до 5 раз [9]. Эти данные подтверждаются зарубежными рекомендациями о необходимости засыпки дренажа подсушенным грунтом [7].

Далее в процессе эксплуатации проницаемость засыпки будет зависеть и от водопримной, и от водоотводящей способности самого дренажа.

В результате проведенных ранее наблюдений при раскопках дренажных линий в глинистых грунтах установлено, что при работе дренажа без застаивания воды в траншейной засыпке последняя сохраняет рыхлую структуру и высокую водопроницаемость спустя более 20 лет после строительства. Там, где в засыпке застаиваются воды, происходит размокание почвенных агрегатов и засыпка по своему физическому состоянию приближается к ненарушенному грунту. Поскольку при атмосферном водном питании отвод избыточных вод дренажно-коллекторной сетью происходит преимущественно через траншейную засыпку, то это явление резко снижает эффективность действия дренажа.

Подобные факты наблюдались при разрушении дренажных труб, выходе из строя смотровых колодцев, подпоре от открытого канала. Разрушение дренажного коллектора вызывает подпор воды в вышерасположенной части коллектора и впадающих в нее дре-

нах, размокание и оплывание грунта засыпки. Восстановление разрушенного коллектора уже не спасало положения, поскольку восстановить проницаемость засыпки было уже невозможно.

Из изложенного следует еще один важный практический вывод: при наличии глинистых или суглинистых грунтов в увлажняемой зоне нельзя устраивать системы подпочвенного увлажнения. Их эффективность будет крайне низкой как при работе в режиме увлажнения, так и в режиме осушения – вследствие образования слабОВОдопроницаемой прослойки из размокшего глинистого грунта в траншейной засыпке.

Усиление эффективности дренажа с помощью дополнительных мероприятий

Из наиболее широко известных и рекомендуемых дополнительных мероприятий по усилению действия дренажа следует отметить в первую очередь глубокое рыхление и кротовый дренаж. Однако в последнее время они почти не упоминаются, что вызвано новыми экономическими условиями. Эффективность глубокого рыхления и кротового дренажа сохраняется в течение 1–2 лет, и только в редких случаях их действие остается заметным на 3–4-й год [10]. После этого эти мероприятия следует возобновлять, но их высокая энергоемкость и возросшие цены на топливо ставят под сомнение результативность данных действий.

Другим важнейшим способом усиления действия дренажа является устройство траншейных засыпок из более проницаемых материалов по сравнению с обратной засыпкой вынутым грунтом. При этом по всей длине дрены она устраивается крайне редко, большей частью для исследовательских целей. Практически такие засыпки выполняют пунктирно либо в локальных понижениях в виде своеобразных фильтрующих окон или водопоглотительных колонок [11]. Широкие исследования засыпок из песчано-гравийной смеси, керамзита и других зернистых материалов проведены в Беларуси, России, Украине, странах Балтии, Германии, Нидерландах, Великобритании и др.

Из всех сыпучих фильтрационных засыпок в первую очередь рекомендуется песчано-гравийная смесь как наиболее распро-

страненный природный и наиболее дешевый материал, если не принимать во внимание транспортные расходы.

Исследованиями Ш. И. Брусиловского установлено, что наименьшую глубину промерзания имеет засыпка из торфа [12]. В весенний период раньше всех оттаивала засыпка из песка и позднее – из торфа. Это объясняется разницей в теплопроводности: торф, особенно сухой, медленно промерзает, но медленно и оттаивает. Весной крайне важны и более раннее включение засыпок в

работу, и соблюдение сроков сева сельскохозяйственных культур.

Изменение водопроницаемости засыпок дренажных траншей через 5 лет после устройства дренажа представлено в табл. 4.

Данные таблицы позволяют заключить, что водопроницаемость засыпок снизилась в верхних слоях вследствие перемешивания с почвой пахотного слоя. В более глубоких горизонтах проницаемость их практически не изменилась, оставаясь достаточно высокой по отношению к засыпке вынутым грунтом.

Таблица 4. **Водопроницаемость засыпок дренажных траншей** [12]

Вид дренажной засыпки	Водопроницаемость (м/сут.) в слое, см					
	1970 г.			1975 г.		
	0–5	20–25	45–50	0–5	20–25	45–50
Вынутый грунт	2,91	0,21	0,07	0,60	0,06	0,08
Смесь гумусного и подпахотного слоев	2,50	0,48	0,17	4,10	0,95	0,11
Гравийно-песчаная смесь	7,0	10,5	7,5	2,0	5,5	7,3

В Литве для отвода поверхностных вод из понижений в дренаж рекомендуется засыпка из смеси вынутого грунта со слаборазложившимся фрезерным торфом, песчано-гравийной смесью, щепой из древесно-кустарни-

ковой растительности, произрастающей на объекте, устройство фашин с обкладкой соломой или обсыпкой щебнем [13]. Для повышения эффекта предлагается вносить не менее 3 % извести от общей массы грунта.

Основные выводы

1. Анализ материалов по теме показал, что изменение коэффициента фильтрации во времени происходит по экспоненциальной зависимости, характерной для большинства естественных затухающих процессов. Однако и спустя 10–15 лет после строительства его значения в 5–8 раз превосходят значения для ненарушенного грунта в междренье.

2. Зафиксировано влияние начальной влажности дренажной засыпки на ее водопроницаемость. Длительными опытами с суглинистыми грунтами при начальной влажности 2, 5, 8, 12, 16 и 20 % установлено, что и коэффициент фильтрации грунта, имевшего начальную

влажность 2 %, оказался в 8 раз большим, чем у грунта с начальной влажностью 20 %.

3. Осушительно-увлажнительные системы нецелесообразно строить при наличии в зоне подпочвенного увлажнения прослоек глинистых или суглинистых грунтов, которые при размокании образуют слабопроницаемую прослойку в траншейной засыпке.

4. При реконструкции систем на слабопроницаемых грунтах технически и экономически наиболее оправдано применение дренажа с устройством фильтрующих окон или водопоглотительных колонок различных конструкций.

Библиографический список

1. Руководство по проектированию и изысканиям объектов мелиоративного и водохозяйственного строительства в Белорусской ССР (РПИ-82) : в 2 ч. / Белгипроводхоз ; гл. ред. П. Е. Лапчук ; ред. комиссия: Г. В. Азява [и др.]. – Минск, 1985. – Ч. 2. Осушительные и осушительно-увлажнительные системы, кн. 1. Осушительные системы самотечные. – 280 с.

2. Мелиоративные системы и сооружения. Нормы проектирования = Мелиоративныя сістэмы і збудаванні. Нормы праектавання : ТКП 45-3.04-8-2005 (02250). – Введ. 01.11.2005 (с отменой на территории Респ. Беларусь СНиП 2.06.03-85). – Минск : М-во арх-ры и стр-ва Респ. Беларусь, 2018. – 116 с.

3. Печенина, В. С. Изменение водопроницаемости дренажных засыпок во времени / В. С. Печенина // Мелиорация и вод. хоз-во. Сер. 2. Экспресс-информация. Эксплуатация мелиоративных систем. – М. : ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1975. – Вып. 12. – С. 3–11.

4. Войтович, И. В. Прогнозирование фильтрационных свойств траншейной засыпки в процессе работы закрытого дренажа / И. В. Войтович // Повышение эффективности осушительно-увлажнительных систем : сб. науч. тр. – Киев : УкрНИИГиМ, 1985. – С. 107–112.

5. Яковлев, В. В. Модули дренажного стока на суглинистых почвах Смоленской области / В. В. Яковлев // Мелиорация и вод. хоз-во. Сер. 2. Экспресс-информация. Эксплуатация мелиоративных систем. – М. : ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1972. – Вып. 3. – С. 25–33.

6. Канцибер, Ю. А. Вариантное проектирование осушительной сети в слабоводопроницаемых грунтах / Ю. А. Канцибер, Ю. Б. Игнатов // Мелиорация и вод. хоз-во. – 1990. – № 11. – С. 33–56.

7. Эггельсманн, Р. Руководство по дренажу / Р. Эггельсманн. – М. : Колос, 1984. – 248 с.

8. Климков, В. Т. Влияние начальной влажности дренажной засыпки на ее водопроницаемость / В. Т. Климков, Л. Н. Чайка // Сельскохозяйственные мелиорации и гидротехника : сб. науч. тр.; редкол.: П. У. Равовой (отв. ред.) [и др.]. – Горки : Белорус. с.-х. акад., 1993. – С. 48–53.

9. Сивицкис, К. К. Осушительная эффективность дренажа в замкнутых впадинах суглинистых почвогрунтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02 / К. К. Сивицкис ; БелНИИМиЛ. – Минск, 1991 г. – 21 с.

10. Рекомендации по осушению тяжелых почв закрытым дренажом с применением агромелиоративных мероприятий и химмелиорантов. – М. : ВНИИГиМ, 1987. – 43 с.

11. Горбачев, В. В. Поглотитель / В. В. Горбачев // Мелиорация : энцикл. справочник / под общ. ред. А. И. Мурашко. – Минск : Белорус. совет. энцикл., 1984. – С. 365–366.

12. Брусиловский, Ш. И. Организация поверхностного стока на минеральных землях / Ш. И. Брусиловский. – Минск : Ураджай, 1985. – 136 с.

13. Блажис, Б. И. Мероприятия для отвода поверхностных вод с дренированных земель / Б. И. Блажис, В. Б. Шаулис // Повышение эффективности осушительно-увлажнительных систем : сб. науч. тр. – Киев : УкрНИИГиМ, 1985. – С. 17–23.

Поступила 23 июня 2021 г

РАЗУПЛОТНЕНИЕ ПОДПАХОТНОГО ГОРИЗОНТА ПОЧВЫ РЫХЛИТЕЛЕМ РП-45-140

Л. С. Шкабаро, инженер-гидротехник

г. Пинск, Беларусь

Аннотация

Переуплотнение почвы – одна из основных причин снижения продуктивности сельскохозяйственных земель. Кроме глинистых и суглинистых почв, переуплотнению подвержены и связносупесчаные почвы, продолжительное время находящиеся в сельскохозяйственном использовании. Основная проблема машин и механизмов, используемых для ликвидации переуплотнения, заключается в необходимости снижения тягового усилия. На основе анализа технических характеристик средств рыхления почвогрунтов предлагается создать опытный образец почвенного рыхлителя типа РП-45-140 с нетрадиционной конструктивной схемой. По содержанию технологического процесса и по качеству работы он близок к рыхлителям пассивного действия. Его назначение – рыхление незасоренных камнями почв на глубину до 45 см; в почвах образуются плужная подошва, присутствуют глеевые прослойки, и во многих случаях подпахотные слои отличаются низкой фильтрационной способностью.

Ключевые слова: переуплотнение почвы, плужная подошва, приемы разуплотнения, конструкция рыхлителя, технологический процесс рыхления.

Abstract

L. S. Shkabaro

DECOMPACTION OF THE UNDERGROUND SOIL LAYER WITH LOOSENER RP-45-140

Over-compaction of the soil is one of the main reasons for reducing the productivity of agricultural land. In addition to clay and loamy soils, cohesive sandy soils that have been in agricultural use for a long time are also subject to over-compaction. The main problem of machines and the mechanisms that are used to eliminate over-compaction is the need to reduce the traction force. Based on the analysis of the technical characteristics of soil loosening tools, it has been proposed to create a prototype of a soil loosener of the RP-45-140 type with an unconventional design scheme. In terms of the content of the technological process and the quality of work, it is close to the rippers of passive action. It is aimed at purpose-loosening of soils that are not littered with stones to a depth of up to 45 cm, in which a plow sole is formed and where there are gley layers and in many cases the subsurface layers are characterized by low filtration capacity.

Keywords: soil overpopulation, plow sole, decompression techniques, ripper design, loosening process.

Причины переуплотнения почвы

Свойства почв связного гранулометрического состава природного (первичного) уплотнения обусловлены высоким содержанием глинистой фракции и характеризуются значительной набухаемостью, гидрофильностью, трещинообразованием и твердением при высыхании, пластичностью, малой водо- и воздухопроницаемостью, частым дефицитом кислорода, слабой микробиологической активностью, склонностью к уплотнению, высоким сопротивлением при обработке. Искусственному (вторичному) уплотнению эти почвы подвергаются под воздействием хозяйственной деятельности человека. Кроме глинистых и суглинистых почв, уплотнению подвержены также связносупесчаные почвы, продолжительное время находящиеся в сельскохозяйственном использовании.

Переуплотнение приводит к деформации почвенного профиля вплоть до разрушения почвенной структуры. Повышаются плотность сложения почвенного горизонта и его твердость, препятствующая механической обработке, уменьшаются водо- и воздухопроницаемость. В результате этого снижаются осушительное действие дренажа и плодородие почвы. Одновременно затрудняется соблюдение оптимальных агротехнических сроков посева и уборки сельскохозяйственных культур из-за переувлажнения, повышается расход горюче-смазочных материалов при выполнении механизированных технологических операций, ускоряется износ сельскохозяйственных машин и механизмов.

Основной причиной вторичного переуплотнения почв является механическое воздей-

ствии ходовых систем сельскохозяйственной и другой техники. Уплотняющая деформация при движении машинно-тракторных агрегатов по полю происходит в вертикальном направлении на 35–70 см и столько же в горизонтальном [1]. Наибольшее уплотнение под действием ходовых систем сельскохозяйственной и другой техники происходит в переувлажненных почвах, особенно при содержании в них органического вещества менее 3,0 %.

Помимо ходовых систем машинно-тракторных агрегатов, отрицательное воздействие на почву оказывают и побочные эффекты от работы некоторых рабочих органов машин. Так, при вспашке почвы традиционными плугами на одну и ту же глубину образовывается так называемая плужная подошва, плотность слоения которой достигает в ряде случаев критических значений (до 1,6 г/см³ и более), что препятствует развитию корневой системы растений [2].

Атмосферные осадки, концентрируясь над переуплотненной прослойкой в пахотном горизонте, приводят к переувлажнению почвы, увеличиваются поверхностный сток

и вынос питательных веществ, развиваются эрозионные процессы. В сухой период, в условиях высоких атмосферных температур, корневая система быстро обезвоживается, растения угнетаются. Вода быстро испаряется из маломощного пахотного слоя (15–20 см), уплотненный подпахотный горизонт при этом препятствует капиллярному подпитыванию от грунтовых вод к корневой системе растений. В результате растения, подверженные в весенний период переувлажнению, оказываются в условиях дефицита влаги, страдая уже от недостатка водного, а значит, и минерального питания. В течение вегетационного периода такие колебания могут происходить неоднократно.

Неудовлетворительные водно- и агрофизические свойства минеральных почв тяжелого гранулометрического состава, вызванные первичным (естественно-генетическим) и вторичным (искусственным) переуплотнением, на мелиорированных землях снижают осушительное действие закрытого дренажа, вызывают переувлажнение корнеобитаемого слоя и ухудшают плодородие почвы.

Предупреждение и ликвидация избыточного уплотнения почв

Мероприятия по предупреждению и ликвидации избыточного уплотнения почв можно разделить на три группы: инженерно-технические, организационные и агротехнические.

В первую группу входят мероприятия, направленные на увеличение площади опоры обрабатывающей техники, использование колесных тракторов и других тяжелых машин со сдвоенными шинами, использование движителей на гусеничном ходу, что уменьшает давление на почву.

Вторую группу составляют мероприятия по применению технологий возделывания сельскохозяйственных культур с минимально возможным числом проходов по полю тяжелой техники, особенно колесной.

Третья группа – это агротехнические мероприятия по снижению переуплотнения почв, которые можно разделить на три подгруппы:

- приемы создания устойчивого рыхлого слоения почв путем их обработки в оптимальные по физической спелости сроки, улучшения структурного состояния с помощью травосеяния, внесения высоких доз

органических удобрений и мелиорантов, содержащих кальций;

- разуплотнение почв с помощью культур, имеющих стержневую корневую систему (редька масличная, яровой и озимый рапс и другие растения с мощной корневой системой), то есть биологическое рыхление;
- приемы разуплотнения с помощью глубокого (более 0,6 м) или эксплуатационного (до 0,5 м) рыхления почв.

Рыхление, проведенное через несколько лет после строительства мелиоративных систем для поддержания благоприятных водно-физических свойств почвы и повторяемое затем периодически, а также выполняемое на автоморфных переуплотненных почвах, называется эксплуатационным.

Увеличение глубины разрыхленного слоя почвы приводит к повышению водопроницаемости и, соответственно, к уменьшению поверхностного стока воды и смыва почвы. Применение эксплуатационного рыхления на мелиорированных уплотненных почвах позволяет увеличивать сток из дренажных систем в 1,5–3 раза.

Механизмы для рыхления почв

На практике применяется множество модификаций специальных рыхлителей с технологией активного и пассивного действия. Например, в Германии и других западноевропейских странах используется почти 50 видов машин и механизмов на глубину рыхления до 150 см. Агрегаты активного действия отличаются более высоким качеством работы, но относительно большей удельной энергоемкостью и меньшей производительностью.

В Беларуси используются рыхлители и плуги пассивного действия с глубиной рыхления в основном до 0,7 м, а также сменные приспособления, монтируемые на плугах общего назначения. Для эксплуатационного рыхления ранее широко применялись чизельные плуги ПЧ-2,5; ПЧ-4,5; ПЧК-2,5; ПЧК-4,5. Их главное назначение – безотвальное глубокое рыхление почвы на глубину до 40–45 см, разрушение плужной подошвы, углубление пахотного слоя, безотвальная обработка почвы вместо зяблевой и весенней пахоты.

В РУП «Институт мелиорации» разработан рыхлитель плужной подошвы РПП-20 – сменное рабочее оборудование к противокаменным плугам общего назначения типа ПГП для рыхления подпахотного горизонта минеральных почв [3].

Рыхлитель позволяет в едином технологическом процессе со вспашкой производить также и разуплотнение плужной подошвы на глубину до 20 см ниже уровня дна борозды, что увеличивает поступление питательных веществ, воды и воздуха к корням растений и улучшает условия для проникновения их в более глубокие слои почвы.

В институте разработано также рыхлительное оборудование РКЛ-50, которое предназначено для рыхления-щелевания почвы средне-

го и тяжелого гранулометрического состава, а также для щелевания сенокосов и пастбищ с целью улучшения водно-физических свойств корнеобитаемого слоя. РКЛ-50 представляет собой сменное рабочее оборудование к плугам общего назначения (типа ПГП) с гидравлической защитой, агрегируемых с тракторами класса тяги до 50 кН. Корпуса плуга с рамы снимаются, и вместо них – в зависимости от марки плуга и категории почвы – через 0,7–1,2 м устанавливается оборудование РКЛ-50.

Испытание тягового усилия рыхлительного оборудования РКЛ-50 (одна стойка, ширина лемеха 70 мм) при глубине рыхления 0,5 м показало, что при категории почвы IIIa (число C = 9–12) тяговое усилие составляет 11–14 кН. А при категории почвы IIIб (число C = 13–16) тяговое усилие достигает 15–19 кН. При оборудовании рыхлителя пятью стойками с шириной лемеха 70 мм суммарное тяговое усилие превысит 50 кН. Поскольку максимальное тяговое усилие колесных тракторов класса 5 (типа К-702) равно 60 кН, рыхлители с пятью стойками и шириной лемеха 70 мм могут использоваться только на пределе тяги трактора.

На основе анализа качественных технических характеристик средств рыхления почвогрунтов в целях снижения тягового усилия предлагается создать опытный образец почвенного рыхлителя типа РП-45-140 с нетрадиционной конструктивной схемой, занимающего по содержанию технологического процесса и качеству работы положение, близкое к рыхлителям пассивного действия. Назначение – рыхление не засоренных камнями почв на глубину до 45 см, в которой образуются плужная подошва, присутствуют глеевые прослойки, и во многих случаях подпахотные слои отличаются низкой фильтрационной способностью.

Характеристики рыхлителя РП-45-140

На рисунке показана детализированная конструктивная схема опытного образца изделия. К основным деталям и узлам относятся: трубчатый брус квадратного сечения, приваренные к нему элементы навесного устройства типа НУ-3, закрепленных на пяти кронштейнах. К кронштейнам привариваются две проушины для нижних тяг гидронавесной си-

стемы трактора «Беларус-1221», и при помощи двух болтов с гайками крепятся пять рабочих органов. Рабочий орган состоит из стойки с приваренными тремя лемехами высотой 180 мм, переменной шириной 160, 200 и 240 мм (для нижнего, среднего и верхнего ярусов соответственно) и опорами. Передняя грань стойки наплавляется твердым сплавом.

Технологический процесс рыхления применительно к каждому рабочему органу состоит в следующем: при движении агрегата подрезанный нижним лемехом пласт (сечение 16×13 см) в частично деформированном виде от надлома на входе перемещается в большее по объему пространство, образованное проходом лемеха среднего яруса (20×13 см), разрезается надвое стойкой и опрокидывается в разрыхленном состоянии в созданную борозду. Аналогичен этому процесс взаимодействия

лемехов среднего и третьего ярусов (сечения 20×13 и 24×19 см соответственно). В верхнем ярусе выполняется по существу безотвальная вспашка пахотного слоя. В случае непреодоления возникшего препятствия срезается предохранительный болт диаметром 18 мм кронштейна или возможна остановка агрегата.

Качеству крошения грунта способствуют ударные нагрузки от падения верхних срезанных грунтов на нижние. В таблице приведены основные характеристики рыхлителя РП-45-140.

Таблица. Расчетные характеристики агрегата РП-45-140

№	Наименование	Значения
1	Тип – навесной/трехъярусный	Трактор класса 30 кН типа Беларус-1221
2	Количество рабочих органов, шт.	5
3	Глубина рыхления, см	до 45
4	Ширина захвата рыхления, см	140
5	Ширина захвата лемехов ярусов (глубина рыхления), см: верхний средний нижний	16(13) 20(16) 24(19)
6	Коэффициент полноты сплошного рыхления, %: верхний ярус (пахотный слой 19 см), нижний и средний ярусы (слой 26 см)	86 64
7	Габаритные размеры (длина, ширина, высота), мм	1060; 1400; 1470
8	Рабочая скорость, км/ч	4–6
9	Сменная производительность, га	до 3,6–5,4
10	Масса, кг	206

Расчеты по формулам определения касательной силы тяги плугов общего назначения, практически равнозначной их тяговому сопротивлению (тяговому усилию трактора), показали, что основные достоинства конструктивной схемы навесной трехъярусный рыхлителя РП-45-140 следующие:

- сравнительно высокий (64 %) коэффициент полноты сплошного рыхления подпахотного горизонта (с зоной частичного рыхления почти 80 %) против 42 % для традиционного рыхлителя пассивного действия стоечного одноярусного типа;
- предотвращение образования крупных кусков разрыхленных грунтов за счет

трехъярусности рабочего органа, небольшой ширины захвата лемеха и отмеченных ударных нагрузок;

- способствование минимизации пестроты условий для развития корневой системы, водного, пищевого, теплового и воздушного режимов почвы;
- совмещение операций рыхления подпахотного горизонта и безотвальной вспашки;
- удобство рыхления небольших по площади (0,1–1,0 га) участков;
- прямоугольная форма зоны рыхления пласта почвы предпочтительнее полуовальной, присущей для одноярусных рыхлителей.

Естественно, что фактические технические характеристики агрегата можно получить только в процессе производственных испытаний опытного образца одновременно с выявлением недостатков конструкции.

Опытный образец РП-45-140 может быть изготовлен предприятием системы агросервиса. Ориентировочная стоимость составит по оценке специалистов порядка 3,0–3,5 тыс. белор. руб. (2017 г.). Имеется техническая документация, разработанная при помощи консультации со специалистами, достаточная для изготовления такого образца. Она может быть передана для использования заинтересован-

ным сторонам. Хозяйственно-экономическая эффективность от применения РП-45-140 ожидается не меньшей, чем от действия других рыхлителей пассивного действия.

При положительных результатах представляется целесообразным создание более мощных агрегатов на основе предложенной конструктивной схемы. С учетом важности и эффективности эксплуатационного рыхления почвы, а также в интересах самих земледельцев целесообразно и особенно важно проводить данное мероприятие на почвах, занятых элитными сортами и высокорентабельными культурами.

Библиографический список

1. Заленский, В. А. Обработка почвы и плодородие / В. А. Заленский, Я. У. Яроцкий ; ред. В. В. Лапа. – Минск : Беларусь, 2004. – 542 с.
2. Рекомендации по применению чизельных орудий / В. В. Труфанов [и др.]. – М. : Изд-во АгроНИИТЭИНТО, 1988. – 26 с.
3. Погодин, Н. Н. Технология и средства механизации для проведения эксплуатационного рыхления почв связного гранулометрического состава / Н. Н. Погодин, В. А. Болбышко, Ф. А. Барсукевич, С. В. Шатило // Мелиорация. – 2009. – № 2 (62). – С. 126–132.

Поступила 12 января 2021 г.

ОЦЕНКА УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКА АВАРИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Н. Н. Линкевич, кандидат технических наук

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь*

Аннотация

Анализ опыта обследования белорусских гидроузлов и шламохранилищ ОАО «Беларускалий» показал, что причинами аварийных ситуаций могут быть дефекты изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружений. На каждом из данных этапов существуют риски аварий. Оценка их риска основывается на результатах контроля и анализа количественных и качественных характеристик состояния сооружения, окружающей среды в зоне его влияния, природных нагрузок и воздействий, ожидаемого ущерба от аварии или разрушения ГТС, соблюдения условий его безопасной эксплуатации и др. Аналогичный подход к оценке риска аварий гидротехнических сооружений по всей совокупности факторов, влияющих на надежность и безопасность сооружений, положен в основу нормативных документов, разработанных в России. При соответствующей адаптации методика может использоваться для оценки риска аварий на водохранилищах Беларуси. В статье дополнены и усовершенствованы составленные ранее автором совместно с Г. Г. Кругловым, В. В. Ивашечкиным и О. А. Мурашко показатели оценки опасности аварий и уязвимости гидротехнических сооружений, а также перечни факторов риска и их отличительные признаки по каждому показателю, характерные для белорусских водохранилищ. Они могут быть рекомендованы к практическому применению в организациях в качестве типовой документации для оценки возможного риска аварий и состояния гидротехнических сооружений в период эксплуатации, а также при проведении обследований ГТС и др.

Ключевые слова: водохранилище, гидротехническое сооружение, безопасность, опасность, уязвимость, авария, риск, факторы риска аварий, отличительные признаки, уровень опасности, уровень уязвимости, уровень риска аварий.

Abstract

N. N. Linkevich

THE ASSESSING OF THE SAFETY LEVEL AND RISK OF ACCIDENTS OF HYDRAULIC STRUCTURES

The analysis of the experience of examining the Belarusian waterworks and sludge storage facilities of JSC «Belaruskali» showed that the causes of emergencies can be defects in the survey, design, construction and operation of structures. At each of these stages there are risks of accidents. The risk assessment is based on the results of control and analysis of quantitative and qualitative characteristics of the state of the structure, the environment in the zone of its influence, natural loads and impacts, expected damage from an accident or destruction of hydraulic structures, compliance with the conditions for its safe operation, etc. A similar approach to assessing the risk of accidents in hydraulic engineering structures for the entire set of factors affecting the reliability and safety of structures, is the basis of the regulatory documents developed in Russia. With appropriate adaptation, this approach can be used to assess the risk of accidents at reservoirs of the Republic of Belarus. The indicators for assessing the hazard of accidents and vulnerability of hydraulic structures, as well as lists of risk factors and their distinguishing features for each indicator, are supplemented and improved, compiled by the author together with G. G. Kruglov, V. V. Ivashchkin and O. A. Murashko, typical for Belarusian reservoirs. They can be recommended for practical use in organizations as standard documentation for assessing the possible risk of accidents and the state of hydraulic structures during operation, as well as when conducting surveys of hydraulic structures etc.

Keywords: reservoir, hydraulic structure, safety, danger, vulnerability, accident, risk, accident risk factors, distinctive signs, hazard level, vulnerability level, accident risk level.

Введение

Процесс возведения и использования гидротехнических сооружений состоит из четырех этапов: изыскания; проектирование; организация и производство строительных работ в соответствии с разработанным проектом; эксплуатация построенных сооружений. На каждом из данных этапов существуют риски аварий, спо-

собные нарушить надежность и безопасность гидротехнических сооружений [1].

Гидротехнические сооружения классифицируют по нескольким признакам. По условиям их использования выделяют постоянные и временные. Постоянные ГТС в зависимости от назначения подразделяют на основные и второстепенные; основные ГТС в зависимости от

их высоты и типа грунтов оснований, социально-экономической ответственности и условий эксплуатации — на классы (I–IV). Для каждого класса сооружений устанавливаются дифференцированные требования [2]. Постоянные основные ГТС I, II, III класса относятся к объектам первого класса сложности, остальные — к объектам второго класса сложности; мелиоративные системы и сооружения, сооружения полносистемных прудовых рыбоводных хозяйств, рыбоводных промышленных комплексов — к объектам третьего класса сложности [3]. В связи с тяжелыми катастрофическими последствиями возможных аварий гидротехнических сооружений, особенно работающих под напором воды, к их надежности предъявляются повышенные требования.

Надежность гидротехнических сооружений можно установить по группе показателей, определяемых инженерными расчетами, а также по другой группе показателей, которые невозможно выявить расчетным путем и которые оцениваются на основании экспертного анализа.

Экспертный анализ факторов, влияющих на риск аварий гидротехнических сооружений, проводится, как правило, на основании рассмотрения следующих основных материалов:

- утвержденный архитектурный и строительный проекты, включая все внесенные в них изменения и данные об инженерно-геологических, гидрогеологических, гидрологических, топографических и природно-климатических условиях строительства;
 - исполнительная документация, включая акты на скрытые работы;
 - декларация безопасности ГТС;
 - критерии безопасности ГТС;
 - правила использования водных ресурсов водохранилищ;
 - инструкция по эксплуатации с регламентацией должностных обязанностей обслуживающего персонала;
 - проект мониторинга ГТС;
 - инструкция по проведению натурных наблюдений (по мониторингу);
 - данные о соответствии проекту состава и состояния контрольно-измерительной аппаратуры (КИА);

- материалы геотехнического контроля в процессе строительства;

- материалы наблюдений состояния ГТС и окружающей среды в зоне влияния гидротехнического сооружения в период эксплуатации, данные о фактических на момент оценки риска аварии ГТС физико-механических и фильтрационных характеристиках материалов сооружения и основания;

- акты инспекторских проверок и комиссионных обследований состояния ГТС, расследований имевших место повреждений и аварий;

- результаты расчетов волны прорыва и оценки возможного ущерба;

- данные о службе эксплуатации ГТС и уровне культуры эксплуатации ГТС (укомплектованность и квалификация штатов, техническая оснащенность, наличие необходимых методических материалов, средств измерений и контроля, регулярность обследований состояния ГТС и проведения текущих ремонтов, привлечение к анализу данных натурных наблюдений специализированных организаций и пр.);

- данные о готовности объекта к локализации и ликвидации аварийных ситуаций (наличие плана ликвидации аварий по возможным сценариям, укомплектованность и оснащенность аварийных бригад и привлекаемых в случае необходимости формирований гражданской обороны инструментами и техникой, наличие и достаточность противоаварийного запаса материалов, регулярность противоаварийных тренировок, наличие и состояние средств связи и системы оповещения и т. п.);

- данные об организации санитарных, защитных и охранных зон гидротехнических объектов [4–10].

Оценка риска аварии ГТС включает оценку частоты (вероятности) и последствий возможной аварии ГТС и сравнение полученных результатов с допустимым уровнем риска аварии ГТС.

Оценка риска основывается на результатах контроля и анализа факторов безопасности, т. е. количественных и качественных характеристик состояния сооружения, окружающей среды в зоне его влияния, природных нагрузок и воздействий, ожидаемого ущерба от аварии или разрушения ГТС, наиболее существенных для данного сооружения, соблюдения условий его безопасной эксплуатации и др.

Количественные оценки опасности, уязвимости, риска аварии ГТС, определяются на основе того, что каждое из этих понятий является сложной функцией многих случайных переменных – факторов. Для получения количественных характеристик указанных понятий необходимо определить полный набор таких факторов. Их объединение по совокупностям будет являться, соответственно, показателями уязвимости, опасности и риска аварии ГТС. В зависимости от величин показателей строится градация по уровням опасности, уязвимости, риска аварии ГТС. Такой подход позволяет работать уже с достаточно ограниченным числом переменных и выполнять общую количественную оценку, которую можно назвать интегральной. За основу количественной оценки опасности, уязвимости, риска на ГТС чрезвычайной ситуации (аварий) (далее – ЧС) принят подход получения нормирующих коэффициентов, характеризующих долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной ситуации, принимаемой за единицу [4, 5, 11–13].

Уровень опасности (уязвимости) по каждому из показателей устанавливается отдельно на том или ином уровне на основании экспертных оценок.

Код опасности (уязвимости) характеризует как количество показателей (четырёхзначный код), так и цифровое выражение уровня опасности (уязвимости) по каждому показателю (четыре уровня опасности (уязвимости)): 0 – опасность (уязвимость) отсутствует; 1 – малая опасность (уязвимость); 2 – средняя опасность (уязвимость); 3 – большая опасность (уязвимость). При этом каждый из четырех показателей опасности (уязвимости) стоит на соответствующем номеру месте.

Балл – цифровое выражение опасности (a_i) и уязвимости (b_i) в пределах установленного кода.

Численные значения баллов должны назначаться в соответствии с кодами, характеризующими уровень опасности (уязвимости) по тому или иному показателю с учетом приведенных ниже рекомендаций. Код по любому из показателей опасности (уязвимости), как правило, совпадает с баллом: например, для кода опасности 2132 – баллы $a_1 = 2$; $a_2 = 1$; $a_3 = 3$; $a_4 = 2$, а для кода уязвимости 3122 –

баллы $b_1 = 3$; $b_2 = 1$; $b_3 = 2$; $b_4 = 2$. При этом дробные значения баллов показателей опасности (уязвимости) могут назначаться лишь в отдельных случаях в соответствии с экспертной оценкой при соответствующем обосновании.

Диапазоны возможных балльных значений следующие: уровню опасности (уязвимости) с кодом 0 соответствует балл 0, с кодом 1 – балл $0 < a_i(b_i) \leq 1$; с кодом 2 – балл $1 < a_i(b_i) \leq 2$; с кодом 3 – балл $2 < a_i(b_i) \leq 3$. Вопросы балльной оценки опасности (уязвимости) ГТС по каждому показателю решаются на этапе изучения имеющихся или получаемых в результате специальных исследований данных. Точность балльной оценки зависит от точности имеющихся данных.

Анализ результатов обследования ряда белорусских гидроузлов и шламоохранилищ ОАО «Беларуськалий» показал, что причинами аварийных ситуаций могут быть дефекты изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружений [7, 14–21]. Аналогичный подход к оценке риска аварий гидротехнических сооружений по всей совокупности факторов, влияющих на надежность и безопасность сооружений, положен в основу нормативных документов, разработанных в НИИ ВОДГЕО и ВНИИ ГОЧСВ МЧС России [4, 5, 13].

Опыт использования данной методики [7, 15] свидетельствует, что при соответствующей адаптации она может использоваться для оценки риска аварий на водохранилищах Беларуси, но для получения всесторонней, оперативной и объективной оценки ее необходимо дополнить. Для этого и были усовершенствованы составленные ранее автором совместно с Г. Г. Кругловым, В. В. Ивашекиным и О. А. Мурашко [7] показатели оценки опасности аварий и уязвимости гидротехнических сооружений, а также перечни факторов риска и их отличительные признаки по каждому показателю. Они могут быть рекомендованы к практическому применению в научно-исследовательских, проектных, строительномонтажных и эксплуатирующих организациях, экспертных центрах, органах, осуществляющих надзор за безопасностью гидротехнических сооружений и страховых компаниях в качестве типовой документации для оценки возможно-

го риска аварий и состояния гидротехнических сооружений водохозяйственного и промышленного назначения в период эксплуатации, а также при проведении обследований ГТС, декларировании их безопасности, экспертизе

Основная часть

Интегральная оценка опасности аварий гидротехнических сооружений определяется по четырем показателям.

1. Превышение принятых при обосновании конструкции сооружения природных нагрузок и воздействий (a_1). Основные факторы риска по первому показателю опасности приведены в [7].

При оценке риска аварии на гидротехническом сооружении по показателю опасности a_1 также оцениваются возможные опасности возникновения негативных природных и техногенных воздействий на ГТС, которые определяются местоположением ГТС. К таким опасностям можно отнести сход селевых и снежных лавин, смерчи, ураганы, цунами, штормовой нагон, развитие карстово-суффозионных процессов, образование заторов, обрушение в водохранилище или накопителях береговых склонов, просадки, связанные с подработкой территории, падение летательного аппарата, взрыв (пожар, химическая авария) на транспортном средстве, диверсия, теракт и др.

Каждый из этих факторов риска может вызвать дефекты и разрушения сооружений различной степени тяжести – от локальных повреждений до перелива воды через гребень земляной плотины и ее размыва [7].

Дополненные и усовершенствованные отличительные признаки по первому показателю, характеризующие каждый из четырех уровней опасности, и соответствующие им коды приведены в табл. 1.

2. Обоснованность проектных решений и их соответствие современным нормативным требованиям (a_2). Основные факторы риска по второму показателю опасности, приведенные в [7], предлагается дополнить следующим: повышение класса гидротехнического

декларации безопасности, страховании рисков аварий, подготовке сведений для формирования регистра гидротехнических сооружений, разработке паспортов безопасности и др.

сооружения без проведения работ по оценке соответствия его новым требованиям.

Отличительные признаки по второму показателю, характеризующие каждый из четырех уровней опасности, и соответствующие им коды приведены в [7, табл. 2].

3. Соответствие проекту конструкций сооружения, технологии его возведения, условий его эксплуатации и свойств материалов сооружения и основания (a_3). Основные факторы риска по третьему показателю опасности, приведенные в [7], предлагается дополнить следующими:

- отличие типов и конструкций гидромеханического оборудования и устройств по их управлению и ремонту, оборудования систем гидротранспорта и обратного водоснабжения, а также другого вспомогательного оборудования от принятых в проекте;
- отличие по номенклатурному и количественному составу и конструкции контрольно-измерительной аппаратуры, установленной на ГТС от принятой в проекте.

Отличительные признаки по третьему показателю, характеризующие каждый из четырех уровней опасности, и соответствующие им коды, приведены в [7, табл. 3]. Рекомендуется дополнить малый уровень опасности (код 1) следующими признаками, помимо ранее установленных:

- КИА, установленной на ГТС (по составу, количеству и качеству аппаратуры);
- вида материала и конструкции крепления откоса (например, вместо бетонного монолитного крепления верхового откоса выполнено железобетонное сборное крепление);
- низовой откос выполнен без промежуточной бермы при сохранении среднего расчетного заложения.

Таблица 1. Уровень опасности по первому показателю

Уровень опасности	Код балл	Отличительные признаки
Опасность отсутствует	$\frac{0}{0}$	Полное соответствие современным нормативным требованиям по всем факторам риска: показатели возможных нагрузок и воздействий на ГТС не отличаются от расчетных значений, принятых при проектировании. Отсутствует возможность возникновения (развития) потенциально опасных воздействий природного и техногенного характера
Малая опасность	$\frac{1}{0 < a_1 \leq 1}$	<p>Показатели возможных нагрузок (гидростатические, ветровые, ледовые, от наносов) и воздействий (волновые, температурные) на ГТС незначительно превышают расчетные значения, принятые при проектировании, но при этом не возникает прямой угрозы разрушения ГТС и/или потери им основных качеств своего назначения. Существует возможность возникновения (развития) потенциально опасных воздействий природного и техногенного характера, которые не приведут к нарушениям эксплуатационного режима, повреждению отдельных конструктивных элементов и оборудования (образование заторов, обрушение в водохранилище береговых склонов и др.), при этом не возникает угроза возникновения ЧС. Например, наблюдаются следующие повреждения и дефекты:</p> <ul style="list-style-type: none"> • размывы травяного покрова на низовых откосах плотин; • разрушение уплотнений деформационных швов плит крепления верхового откоса плотины; • одиночные мелкие (до 0,2–0,3 мм) трещины в плитах крепления откосов и бетонных конструкциях сооружений; • локальные обнажения арматуры; • неглубокие сколы, раковины на поверхностях бетонных сооружений; • дефекты изоляции, отдельные белесые пятна выщелоченного бетона; • незначительная фильтрация через деформационные швы; • незначительные осадки сооружений. <p>Не требуется дополнительных расчетных обоснований, конструктивных изменений и специальных организационных мероприятий для безопасной эксплуатации ГТС</p>
Средняя опасность	$\frac{2}{1 < a_1 \leq 2}$	<p>Показатели возможных нагрузок и воздействий на ГТС существенно превышают расчетные значения, принятые при проектировании, но при этом не возникает прямой угрозы разрушения ГТС и/или потери им основных качеств своего назначения. Существует возможность возникновения (развития) потенциально опасных воздействий природного и техногенного характера, которые могут привести к нарушениям эксплуатационного режима, повреждению отдельных конструктивных элементов и оборудования (сход снежных лавин и др.), при этом возникает угроза возникновения ЧС локального характера. Например, наблюдаются:</p> <ul style="list-style-type: none"> • образование суффозионных воронок, провалы, просадки в районе расположения ГТС; • в береговой зоне ГТС – оползневые явления; • выход фильтрационного потока на низовой откос плотины; • оплывание низового откоса; • механическая суффозия грунта тела плотины и основания; • разрушение плит крепления верхового откоса плотины; • раскрытие конструктивных швов; • развитие трещин (более 0,3–0,5 мм) на поверхности бетонных конструкций; • повреждения затворов и закладных частей; • повороты, наклоны бычков, устоев. <p>Требуется проведение дополнительных расчетных обоснований, конструктивных изменений и специальных организационных мероприятий для безопасной эксплуатации ГТС</p>
Большая опасность	$\frac{3}{2 < a_1 \leq 3}$	<p>Показатели возможных нагрузок и воздействий (прежде всего сейсмические воздействия или паводковые расходы) на ГТС значительно превышают расчетные значения, принятые при проектировании, в связи с чем возникает прямая угроза разрушения ГТС и/или потери им способности выполнять заданные функции. Существует возможность возникновения (развития) потенциально опасных воздействий природного и техногенного характера, которые могут привести к нарушениям эксплуатационного режима, разрушению конструктивных элементов и оборудования (район расположения ГТС находится в зоне боевых действий или действия террористических групп, сход селевых лавин и др.), при этом возникает угроза возникновения ЧС, превышающей локальную. Например, наблюдаются такие повреждения и дефекты:</p> <ul style="list-style-type: none"> • подъем уровня верхнего бьефа, перелив через гребень земляной плотины и прорыв напорного фронта; • превышение расчетного сейсмического воздействия, разрушение плотины и прорыв напорного фронта; • подмыв крутых берегов водохранилища и образование оползней; • разрушение бетонных сооружений гидроузлов. <p>Необходимо проведение срочных организационных мероприятий и/или проектно-строительных работ по изменению режима эксплуатации и/или реконструкции (капитального ремонта) ГТС, вывода его из эксплуатации</p>

4. Возможные последствия и ущерб при аварии гидротехнических сооружений (a_4). Отличительные признаки по четвертому показателю характеризуют каждый из четырех уровней опасности и соответствующие им

коды; определены в соответствии с классификацией масштабов возможных чрезвычайных ситуаций, принятой МЧС Республики Беларусь (табл. 2) [22].

Таблица 2. Возможные последствия и ущерб при аварии гидротехнических сооружений (a_4)

Уровень опасности	Код балл	Масштаб возможной ЧС	Отличительные признаки			
			число пострадавших, чел.	нарушены условия жизнедеятельности, чел.	базовая величина материального ущерба	зона распространения ЧС
Опасность отсутствует	$\frac{0}{0}$	—	—	—	—	—
Малая опасность	$\frac{1}{0 < a_4 \leq 1}$	локальная	<10	<100	40–1000	не выходит за пределы территории гидроузла
Средняя опасность	$\frac{2}{1 < a_4 \leq 2}$	местная	10–50	100–300	1000–5000	не выходит за пределы населенного пункта, города, района
Большая опасность	$\frac{3}{2 < a_4 \leq 3}$	региональная	50–500	300–500	5000–500 000	не выходит за пределы области
		республиканская	>500	>500	>500 000	выходит за пределы более чем двух областей
		трансграничная	—	—	—	поражающие факторы выходят за пределы Беларуси

По отличительным признакам, приведенным в табл. 1–2, а также в [7, табл. 2 и 3], с учетом дополненных нами, и соответствующим им кодам (баллам) определяется коэффициент опасности λ в виде доли от наиболее неблагоприятной ситуации на гидроузле по сочетанию показателей опасности. Наиболее неблагоприятному сочетанию уровней четырех рассмотренных показателей опасности соответствует интегральный код 3333 при баллах $a_1 = 3$; $a_2 = 3$; $a_3 = 3$; $a_4 = 3$, при котором коэффициент опасности $\lambda = 1,0$; в остальных случаях λ изменяется в диапазоне: $0 \leq \lambda < 1$.

Коэффициент опасности λ определяется по соотношению

$$\lambda = \lambda_0 \sum_{i=1}^4 \delta_i a_i \quad (1)$$

где λ_0 – нормирующий множитель показателя опасности; δ_i – коэффициент значимости i -го показателя опасности; a_i – значение балла i -го показателя опасности.

Поскольку выбрана трехбалльная система (максимальная опасность – балл 3), то $\lambda_0 = 1/3$.

Количественные оценки коэффициентов значимости показателей опасности δ_i приведены в [5] и составляют для первого и треть-

го показателей опасности 0,3, а для второго и четвертого – 0,2.

Расчетная величина коэффициента опасности λ является критерием для оценки интегральной опасности процессов на ГТС.

Интегральная оценка уязвимости гидротехнических сооружений определяется их восприимчивостью, а также восприимчивостью окружающей среды (в зоне влияния сооружения) к воздействию факторов опасности по следующим четырем показателям.

1. Состояние сооружения (по данным натурных обследований) (b_1).

Экспертная оценка уязвимости ГТС по первому показателю производится на основе анализа результатов визуальных и инструментальных наблюдений, осмотров, комиссионных обследований и специальных изыскательских и научно-исследовательских работ. Состояние сооружения и его основания оцениваются с учетом установленных нарушений их конструктивных элементов и соответствия контролируемых параметров их предельно допустимым значениям (ПДЗ). ПДЗ параметров состояния, соответствующие допустимому уровню риска аварии ГТС, принимаются равными расчетным

значениям для основного и особого сочетания нагрузок или значениям, уточненным в процессе эксплуатации и утвержденные в установленном порядке органами исполнительной власти, уполномоченными на осуществление государственного надзора в области безопасности ГТС.

Отличительные признаки, характеризующие каждый из четырех уровней уязвимости по первому показателю, и соответствующие им коды приведены в [7, табл. 5]. Рекомендуется дополнить большой уровень уязвимости (код 3) таким признаком, помимо ранее установленных, как неисправность или отсутствие электропитания приводных устройств.

По первому показателю уровень уязвимости ГТС, находящихся в эксплуатации более 50 лет, рекомендуется повышать на один уровень (если отсутствуют данные инструментального обследования по определению фактических геометрических параметров, физико-механических характеристик материалов основания и тела ГТС, а также его конструктивных элементов, оценки состояния гидромеханического оборудования и др.).

2. Состояние окружающей среды в зоне влияния гидротехнического сооружения (по данным мониторинга) (b_2).

Экспертная оценка уязвимости ГТС по второму показателю производится на основе анализа результатов мониторинга состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС и сравнения контролируемых параметров с ПДЗ, которые устанавливаются в соответствии с нормативными и/или проектными требованиями.

К основным факторам риска по второму показателю уязвимости относятся:

- несоблюдение правил организации и содержания водоохраных зон и зон санитарной охраны;
- несоответствие мониторинга состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС нормативным и/или проектным требованиям;
- несоответствие количества КИА нормативным и/или проектным требованиям и/или неработоспособность части КИА;
- несоблюдение установленной периодичности осмотров и наблюдений нормативным и/или проектным требованиям;

- несоответствие проводимых наблюдений по составу нормативным и/или проектным требованиям;

- наличие «цветения» воды в водохранилище непитьевого назначения;

- несоответствие качества воды в водохранилище или накопителе установленным нормам и/или проектным требованиям;

- несоответствие качества грунтовых вод в зоне влияния накопителей жидких отходов нормам и/или проектным требованиям;

- несоответствие качества воды в поверхностных водоемах, попадающих в зону влияния ГТС, нормам и/или проектным требованиям;

- несоответствие показателей качества донных отложений водохранилищ и накопителей отходов, а также складированных гидромеханическим способом промышленных отходов нормативным и/или проектным значениям;

- несоответствие содержания вредных веществ в почве и грунтах в зоне влияния ГТС промышленного назначения нормам и/или проектным требованиям;

- наличие процессов загрязнения почв и подстилающих их грунтов в зоне влияния накопителей жидких отходов;

- несоблюдение нормативных или проектных показателей по доле мелководных зон в площади водохранилища;

- наличие эрозии береговой зоны водохранилищ;

- наличие заболачивания территории в нижнем бьефе водохранилища;

- наличие пыления береговой зоны водохранилищ и особенно накопителей жидких отходов;

- наличие переноса вредных, токсичных и ядовитых жидкостей из накопителей жидких отходов в процессе испарения;

- наличие изменений состояния флоры и фауны в зоне влияния ГТС, связанных с ухудшением здоровья и гибелью растений и животных, а также с уменьшением видового и численного состава растений и животных.

Отличительные признаки, характеризующие каждый из четырех уровней уязвимости по второму показателю, и соответствующие им коды приведены в табл. 3.

Таблица 3. Уровень уязвимости гидротехнических сооружений по второму показателю (b_2)

Уровень уязвимости	Код балл	Отличительные признаки
Уязвимость отсутствует	$\frac{0}{0}$	Отсутствуют какие-либо нарушения состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС
Малая уязвимость	$\frac{1}{0 < b_2 \leq 1}$	<p>Имеются локальные нарушения состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС при отсутствии превышения предельно допустимых значений контролируемых параметров состояния. Например:</p> <ul style="list-style-type: none"> • содержание вредных веществ в грунтовых водах, почве, грунтах и поверхностных водоемах в зоне влияния ГТС промышленного назначения превышает фоновые показатели, но меньше ПДЗ; • временное «цветение» воды в водохранилище непитьевого назначения; • эрозия берегов на ограниченных участках; • временное пыление береговых зон; • на ограниченных участках изменение состояния флоры и фауны в зоне влияния ГТС (заболачивание, залужение и т. п.)
Средняя уязвимость	$\frac{2}{1 < b_2 \leq 2}$	<p>Имеются нарушения состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС, которые не могут быть устранены без проведения неотложных ремонтных работ и/или изменения режима эксплуатации объекта. Наблюдаются превышения ПДЗ контролируемых параметров. Например:</p> <ul style="list-style-type: none"> • существенное ухудшение качества воды и/или донных отложений в водохранилище при соблюдении ПДЗ; • содержание вредных веществ в грунтовых водах в зоне влияния ГТС промышленного назначения незначительно превышает ПДЗ; • содержание вредных веществ в поверхностных водоемах в зоне влияния ГТС промышленного назначения незначительно превышает ПДЗ; • содержание вредных веществ в почве и грунтах в зоне влияния ГТС промышленного назначения незначительно превышает ПДЗ; • пыление береговых зон; • на значительных участках – эрозия берегов; • на значительных участках – изменение состояния флоры и фауны в зоне влияния ГТС, например, заболачивание, залужение и т. п.; • долговременное «цветение» воды в водохранилище непитьевого назначения; • изменение состояния флоры и фауны в зоне влияния ГТС с уменьшением видового и численного состава растений и животных; • незначительный перенос вредных, токсичных и ядовитых веществ из накопителей жидких отходов в процессе испарения при соблюдении их ПДЗ на прилегающих территориях; • отдельные нарушения правил организации и эксплуатации санитарных зон; • организация мониторинга состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС по отдельным позициям не соответствует нормативным и/или проектным требованиям: <ul style="list-style-type: none"> а) недостаточное количество и/или неработоспособное состояние части КИА; б) несоблюдение установленной периодичности осмотров и наблюдений; в) несоответствие проводимых наблюдений по составу и т. п.
Большая уязвимость	$\frac{3}{2 < b_2 \leq 3}$	<p>Имеются существенные нарушения состояния окружающей среды в зоне влияния ГТС, приводящие к деградации и разрушению отдельных ее элементов (почва, водные объекты, флора, фауна и т. п.) или системы в целом. Наблюдаются превышения ПДЗ контролируемых параметров состояния. Например:</p> <ul style="list-style-type: none"> • содержание вредных веществ в грунтовых водах в зоне влияния ГТС промышленного назначения существенно превышает ПДЗ; • содержание вредных веществ в поверхностных водоемах в зоне влияния ГТС промышленного назначения существенно превышает ПДЗ; • содержание вредных веществ в почве и грунтах в зоне влияния ГТС промышленного назначения существенно превышает ПДЗ; • качество воды и/или донных отложений в водохранилище не соответствует установленным ПДЗ; • не соблюдаются правила организации и эксплуатации санитарных зон; • не проводится мониторинг состояния окружающей среды (за исключением случаев, когда отказ от такого мониторинга обоснован); • необратимые изменения состояния флоры и фауны в зоне влияния ГТС, связанные с ухудшением здоровья и гибелью растений и животных. <p>Дальнейшая эксплуатация сооружения невозможна. Требуется обязательное проведение работ по рекультивации и восстановлению окружающей среды</p>

3. Организация эксплуатации гидротехнических сооружений (соблюдение требований безопасной эксплуатации) (b_3).

К основным факторам риска по третьему показателю уязвимости относятся:

- недоукомплектованность штатов и недостаточный уровень квалификации эксплуатационного персонала;
- недоукомплектованность необходимой техникой, механизмами, инструментами, расходными материалами и т. п.;
- частичное или полное отсутствие необходимой проектной, эксплуатационной и нормативно-методической документации по сооружениям гидроузла (проекта гидротехнического сооружения; декларации безопасности; критериев безопасности; правил использования водных ресурсов водохранилища; инструкции по эксплуатации ГТС с регламентацией должностных обязанностей персонала, схемы заполнения накопителя промышленных отходов, вопросов техники безопасности и охраны окружающей среды; инструкции по мониторингу (проведению контрольных наблюдений) ГТС; ежегодных графиков планово-предупредительных ремонтов сооружений, сетей и оборудования, а также данных о фактически проведенных работах; материалов геотехнического контроля в процессе строительства; документации по проводимым эксплуатирующей организацией наблюдениям за состоянием ГТС и окружающей среды (журналов и графиков наблюдений, приказов и распоряжений в связи с выявленными недостатками и т. п.); обобщенных материалов наблюдений в период эксплуатации (годовых отчетов, аналитических записок, заключения и рекомендаций специализированных организаций), а также материалов инспекторских проверок и обследований состояния ГТС; документации по расследованию аварий и повреждений; предписаний органов государственного и авторского надзора; нормативно-методических пособий и рекомендаций, необходимых для эксплуатации рассматриваемого гидротехнического сооружения, в том числе правил безопасности, методических пособий по проведению мониторинга и ремонтных работ, заводских паспортов и инструкций по эксплуатации установленного гидромеханического, насосного и вспомогательного оборудования и т. п.);

- отсутствие и/или неработоспособность части контрольно-измерительной аппаратуры;
- нерегулярность контрольных наблюдений и комиссионных обследований состояния ГТС;
- недостаточный уровень и нерегулярность технического обслуживания и ремонта оборудования (механизмов) и сооружений;
- несоблюдение правил эксплуатации (режима наполнения и сработки водохранилища, маневрирования затворами, схемы и интенсивности заполнения накопителя и др.);
- несоблюдение правил организации и содержания защитных и охранных зон ГТС, в том числе наличие (при необходимости) предупредительных и запретительных знаков, ограждения, освещения, охраны, а также иных разработанных мероприятий по предотвращению несанкционированного проникновения в охранную зону, обеспечивающих антитеррористическую защищенность объекта.

Отличительные признаки, характеризующие каждый из четырех уровней уязвимости по третьему показателю, и соответствующие им коды, приведены в [7, табл. 6]. Рекомендуется дополнить средний уровень уязвимости (код 2) следующими признаками, помимо ранее установленных:

- отсутствие запаней;
 - отсутствие полыней перед затворами и сооружениями, не рассчитанными на давление льда;
 - несоблюдение правил организации и эксплуатации защитных и охранных зон гидротехнического объекта (при отсутствии прямой угрозы теракта или диверсии);
- большой уровень уязвимости (код 3) – такими признаками:
- эксплуатация устройств и механизмов, выработавших нормативный ресурс;
 - несоблюдение правил организации и эксплуатации защитных и охранных зон гидротехнического объекта (при наличии прямой угрозы теракта или диверсии).

4. Готовность организации, эксплуатирующей ГТС, к предупреждению, локализации и ликвидации ЧС (b_4).

К основным факторам риска по четвертому показателю уязвимости относятся:

- отсутствие типовых решений по локализации и ликвидации чрезвычайных (аварийных) ситуаций по возможным сценариям их разви-

тия на ГТС объекта, плана оперативных действий персонала при возникновении ЧС, плана эвакуации персонала и населения из зоны возможного затопления волной прорыва;

- неподготовленность персонала к действиям в условиях ЧС;

- отсутствие и неуккомплектованность аварийно-ремонтных и аварийно-спасательных бригад;

- нерегулярность проведения тренировок аварийно-ремонтных бригад и дежурного персонала гидроузла по локализации и ликвидации аварийных ситуаций;

- недостаточная оснащенность аварийно-ремонтных бригад и привлекаемых в случае необходимости для ликвидации ЧС формирований инструментом, оборудованием и механизмами для выполнения аварийно-спасательных работ;

- отсутствие и недостаточность аварийного запаса строительных материалов для локализации и ликвидации аварийной ситуации;

- отсутствие и плохое состояние дорог, мостов и подъездов к гидроузлу и на его территории;

- отсутствие и плохое состояние средств связи (в том числе аварийных) и системы оповещения персонала и населения в нижнем бьефе ГТС;

- отсутствие заключения о готовности организации, эксплуатирующей ГТС, к локализации и ликвидации ЧС и защите населения и территорий в случае аварии ГТС;

- отсутствие структурированной системы мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений.

Отличительные признаки, характеризующие каждый из четырех уровней уязвимости по четвертому показателю, и соответствующие им коды приведены в [7, табл. 7].

Рекомендуется дополнить средний уровень уязвимости (код 2) такими признаками, помимо ранее установленных, как нерегулярные проверки и опробование аварийных средств связи и систем оповещения персонала и/или населения в нижнем бьефе ГТС;

большой уровень уязвимости (код 3) – следующими признаками:

- неподготовленность персонала к действиям в условиях ЧС;

- отсутствие подъездов к ГТС;

- отсутствие средств связи (в том числе аварийных) и надежной системы оповещения персонала и/или населения в нижнем бьефе ГТС;

- отсутствие заключения о готовности организации, эксплуатирующей ГТС, к локализации и ликвидации ЧС и защите населения и территорий в случае аварии на ГТС.

Каждый из рассмотренных показателей уязвимости может проявляться независимо от других, а уровень уязвимости ГТС зависит от их комплексного воздействия.

По отличительным признакам, приведенным в табл. 3, а также в [7, табл. 5–7], с учетом дополненных нами, и соответствующим им кодам (баллам) определяется коэффициент уязвимости v в виде доли от наиболее неблагоприятной ситуации на гидроузле по сочетанию показателей уязвимости. Наиболее неблагоприятному сочетанию уровней четырех рассмотренных показателей уязвимости соответствует интегральный код 3333 при баллах $b_1 = 3; b_2 = 3; b_3 = 3; b_4 = 3$, при котором $v = 1,0$, в остальных случаях v изменяется в диапазоне: $0 \leq v < 1$.

Коэффициент уязвимости v определяется по формуле

$$v = v_0 \sum_{i=1}^4 \varphi_i b_i \quad (2)$$

где v_0 – нормирующий множитель показателя уязвимости; φ_i – коэффициент значимости i -го показателя уязвимости; b_i – значение балла i -го показателя уязвимости.

Поскольку выбрана трехбалльная система (максимальная уязвимость – балл 3), то $v_0 = 1/3$.

Количественные оценки коэффициентов значимости показателей уязвимости φ_i приведены в [5, 13] и составляют для первого показателя уязвимости 0,35, второго – 0,15, третьего – 0,3, четвертого – 0,2.

Оценка риска аварии на гидроузле производится на основании экспертного анализа уровня опасности аварии и уровня уязвимости гидротехнических сооружений. Для оценки уровня риска аварии определяется коэффициент риска аварии R на основе принципа пересечения этих событий (риск возникает только в области пересечения опасности с объектом и не существует без них):

$$R = \lambda v. \quad (3)$$

Коэффициент риска аварии R представляет собой долю от максимального риска, возмож-

ного на гидроузле при наиболее неблагоприятных сочетаниях показателей опасности (код 3333, $\lambda = 1$) и уязвимости (код 3333, $\nu = 1$), т. е. меру (дозу) опасного воздействия на данное ГТС с установленным уровнем уязвимости.

Уровень риска аварии и уровень безопасности ГТС оценивается по величине коэффициента риска аварии R в соответствии с данными табл. 4 [4].

Таблица 4. **Уровень риска аварии и уровень безопасности гидротехнических сооружений**

Уровень риска аварии (уровень безопасности ГТС)	Коэффициент риска аварии R
Малый (нормальный уровень безопасности)	не более 0,15
Умеренный (пониженный уровень безопасности)	свыше 0,15, но не более 0,3
Большой (неудовлетворительный уровень безопасности)	свыше 0,3, но не более 0,5
Аварийная ситуация (критический уровень безопасности)	свыше 0,5

При этом следует иметь в виду, что если хотя бы один показатель опасности или уязвимости принимает максимальное значение, равное 3, то *уровень безопасности принимается неудовлетворительным*.

Диапазоны изменения коэффициента R в табл. 4 установлены таким образом, чтобы была возможность практически увязать характеристики риска аварии с качественными характеристиками уровня безопасности, регламентированными [23].

В области значений коэффициента риска аварии $R \leq 0,15$ (малый уровень риска аварии) уровень безопасности гидротехнических сооружений оценивается как нормальный. Сооружение удовлетворяет всем проектным требованиям по назначению и конструктивной надежности, а также современным нормативным требованиям. Критерии безопасности, то есть предельные значения количественных и качественных показателей состояния гидротехнического сооружения и условий его эксплуатации, соответствующие допустимому уровню риска аварии гидротехнического сооружения и утвержденные в порядке, установленном законодательством, не превышают предельно допустимые для работоспособного состояния сооружения и основания. Физический износ конструкций – до 10 %. Малозначительные дефекты устраняют в процессе установленного регламента технического обслуживания. При фактических нагрузках и воздействиях эксплуатация сооружения в со-

ответствии с функциональным назначением разрешается без ограничений до очередного обследования при обеспечении мониторинга безопасности.

В области значений коэффициента риска аварии $0,15 < R \leq 0,30$ (умеренный уровень риска аварии) уровень безопасности гидротехнических сооружений оценивается как пониженный. Эксплуатирующей организацией допускается нарушение правил технической эксплуатации, невыполнение первоочередных мероприятий или неполное выполнение предписаний органов государственного надзора по обеспечению безопасности гидротехнического сооружения при прочих показателях, соответствующих нормальному уровню безопасности ГТС. Критерии безопасности не превышают предельно допустимые для работоспособного состояния сооружения и основания. Физический износ конструкций – от 10 до 30 %. Имеющиеся дефекты не приводят к нарушению работоспособности конструкции в конкретных условиях эксплуатации, но в перспективе могут снизить ее долговечность. Дефекты устраняют в процессе технического обслуживания и текущего ремонта, уточненные сроки которого могут быть назначены аттестованным специалистом по обследованию зданий (сооружений). При фактических нагрузках и воздействиях эксплуатация сооружения (конструкции) разрешается без ограничений до очередного обследования. Конкретный перечень мероприятий по повышению уровня безопасности вытекает

из анализа факторов, обуславливающих максимальные значения показателей опасности и уязвимости.

При значении коэффициента риска аварии $0,30 < R \leq 0,50$ (большой уровень риска аварии) уровень безопасности гидротехнических сооружений оценивается как неудовлетворительный. Снижена механическая или фильтрационная прочность элементов сооружений, превышены предельно допустимые критерии безопасности для работоспособного состояния, другие отклонения от проектного состояния, способные привести к аварии. Физический износ конструкций – 31–50 %. Имеющиеся дефекты оказывают некоторое влияние на несущую способность конструкции, но опасность внезапного разрушения отсутствует. Эксплуатация сооружения (конструкции) при фактических нагрузках разрешается при периодическом контроле его (ее) состояния, строгом соблюдении всех эксплуатационных требований, при возможных ограничениях некоторых параметров эксплуатации. Требуется детальное обследование и расчет прочности и устойчивости сооружения (конструкции) с оценкой степени ее нагруженности ($CH \leq 0,95$), а также разработка мероприятий по ремонту и при необходимости — усилению конструкции. Не усиленные конструкции требуют повторного обследования в сроки, установленные аттестованным специалистом по обследованию зданий. Дальнейшая эксплуатация сооружения в проектном режиме недопустима без проведения в установленные органами государственного надзора сроки тех или иных технических (вплоть до капитального ремонта, замены оборудования и др.) и организационных мероприятий по снижению риска аварии и восстановлению нормального уровня безопасности на основе анализа факторов, обуславливающих максимальные значения показателей опасности и уязвимости. К проведению такого анализа и разработке мероприятий по повышению уровня безопасности должны, как правило, привлекаться специализированные научно-исследовательские и проектные организации. В случае необходимости по специальным программам предусматриваются полевые исследования физико-механических характеристик грунтовых материалов, бетонных конструкций

и т. д., корректируются ПДЗ контролируемых параметров состояния и пр.

Значения коэффициента риска аварии $R > 0,50$ свидетельствуют о возникновении аварийной ситуации, уровень безопасности гидротехнических сооружений оценивается как *критический*. Эксплуатация сооружения (конструкции) происходит при развивающемся снижении прочности и устойчивости элементов конструкции и основания, превышении предельно допустимых критериев безопасности, характеризующих переход от ограниченно работоспособного к неработоспособному состоянию сооружения и основания. Физический износ конструкций – 51–70 %; значительная степень поврежденности конструкции или ее перегрузка (степень нагруженности $CH > 1$); высокая вероятность разрушения данной конструкции. В этом случае дальнейшая эксплуатация сооружения в проектном режиме по условиям риска аварии недопустима и должна осуществляться в соответствии с требованиями [24].

При критическом уровне безопасности ГТС необходимы незамедлительное ограничение нагрузок (снижение уровня верхнего бьефа и др.), срочное усиление или замена конструкции (уточняется расчетом). Замена конструкции выполняется при значительной сложности или экономической нецелесообразности ее усиления. В исключительных случаях до выполнения восстановительных работ разрешается временная эксплуатация данного участка или ГТС в целом на срок, установленный аттестованным специалистом по обследованию зданий (сооружений), при непрерывном осуществлении мониторинга состояния конструкции и неукоснительным выполнении конкретных страховочных мероприятий (ограждения опасных зон, ограничения нагрузок, скорости и путей передвижения транспорта и т. п.). Мероприятия по восстановлению нормального уровня безопасности должны выполняться на основании анализа факторов, обуславливающих возникновение аварийной ситуации, с обязательным привлечением специализированных организаций. После проведения необходимых мероприятий перевод сооружений вновь в проектный режим эксплуатации должен быть согласован с органами госнадзора за безопасностью гидротехнических сооружений.

Расчеты коэффициента риска аварии R позволяют не только определять уровень безопасности ГТС, но и оценивать вероятность возникновения аварии P_a (ГТС) по методике, разработанной в НИИ ВОДГЕО и Всероссийском научно-исследовательском институте по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС [5, 13]. При этом допустимые значения вероятности возникновения аварий на водонапорных ГТС I–III классов опасности $P_{\text{доп}}$ (ГТС) в соответствии с СН 3.04.01-2020 [2] составляют для сооружений классов: I – $5 \cdot 10^{-5}$; II – $5 \cdot 10^{-4}$ и III – $3 \cdot 10^{-3}$ 1/год (в России для III класса $P_{\text{доп}} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/год). Допустимое значение вероятности возникновения аварии на водонапорных ГТС IV класса в [2] не приводится, поэтому в соответствии с [13, 25] для IV класса $P_{\text{доп}}$ можно принять равным $5 \cdot 10^{-3}$ 1/год. Классификация уровня риска по значению вероятности аварии ГТС I–IV классов в нормах Республики

Заключение

Дополненные и усовершенствованные показатели оценки опасности аварий и уязвимости гидротехнических сооружений, а также перечень факторов риска и их отличительные признаки для всех этапов создания и использования ГТС различных типов и классов позволяют после выполнения детального обследования гидротехнических сооруже-

Беларусь также не приводится, ее можно принимать в соответствии с [13].

Если при оценке риска аварии гидротехнических сооружений вне зависимости от конечных величин R и P_a (ГТС) установлены максимальные значения тех или иных показателей опасности и уязвимости с кодом З, собственник (эксплуатирующая организация) обязан информировать об этом органы государственного надзора за безопасностью гидротехнических сооружений и принять меры по устранению причин, вызывающих повышенную опасность или уязвимость сооружения по конкретному показателю в сроки, установленные соответствующим предписанием органов госнадзора.

Оценка риска аварии ГТС как мера опасности в виде возможных потерь в экономической, социальной и экологической сферах может быть выполнена в соответствии с [5, 13].

ний, определения их технического состояния объективно оценивать уровень безопасности и риска аварий на гидротехнических сооружениях Беларуси. Это позволит выявить наиболее опасные водохранилища, а затем своевременно разработать мероприятия по предотвращению аварий.

Библиографический список

1. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения : ГОСТ 27.002-89. – Введ. 01.07.90. – М. : Издательство стандартов, 1990. – 37 с.
2. Гидротехнические сооружения общего назначения. СН 3.04.01-2020. – Введ. 13.07.2021. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 135 с.
3. Объекты строительства. Классификация. СН 3.02.07-2020. – Введ. 10.06.2021. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 9 с.
4. Методические рекомендации по оценке риска аварий гидротехнических сооружений водохранилищ и накопителей промышленных отходов / Н. Н. Розанов [и др.]; под науч. рук. Н. Н. Розанова и Н. П. Куранова ; науч. ред. В. С. Алексеев и Э. М. Хохлатов. – М. : ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2002. – 43 с.
5. Методические рекомендации по оценке риска аварий на гидротехнических сооружениях водного хозяйства и промышленности / Федер. агентство Рос. Федерации по стр-ву и жилищно-коммунальному компл. ; ред. Н. П. Куранов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ДАР/ВОДГЕО, 2009. – 64 с.
6. Методика оценки уровня безопасности гидротехнических сооружений : стандарт предприятия: СТП НИИЭС / И. Н. Иващенко [и др.]; под науч. рук. И. Н. Иващенко. – Утв. и введ. в действие приказом № 14 от 01.06.2004. – М. : ОАО «Науч.-исслед. ин-т энергетических сооружений», 2004. – 24 с.

7. Круглов, Г. Г. Факторы риска и их отличительные признаки для оценки степени опасности водохранилищ / Г. Г. Круглов, В. В. Ивашечкин, Н. Н. Линкевич, О. А. Мурашко // Мелиорация. – 2017. – № 1 (79). – С. 22–30.

8. Об утверждении Правил по обеспечению промышленной безопасности при эксплуатации гидротехнических сооружений и устройств на опасных производственных объектах (в ред. постановления МЧС от 22.03.2017, № 6) : постановление М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, 30 марта 2015 г., № 15 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – 11.04.2015. – 8/29775.

9. Обследовать состояние и дать экспертную оценку риска аварий подпорных гидротехнических сооружений потенциально опасных водохранилищ Республики Беларусь при пропуске половодий и паводков [Электронный ресурс] : отчет о НИР (заключ.) : ГБ 16-29 / Белорус. нац. техн. ун-т ; науч. рук. В. В. Ивашечкин ; исполн.: Г. Г. Круглов [и др.]. — Электрон. дан. – Минск : [б. и.], 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – 78 с. – № ГР 20162259.

10. Разработка методики определения опасности водохранилищ в Республике Беларусь при половодьях и паводках на примере гидроузлов Минской области [Электронный ресурс] : отчет о НИР (заключ.) : ГБ 14-137 / Белорус. нац. техн. ун-т ; науч. рук. В. В. Ивашечкин; исполн.: Г. Г. Круглов [и др.]. – Электрон. дан. – Минск : [б. и.], 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD-R). – 62 с. – № ГР 20140703.

11. Рагозин, А. Л. Теория и практика оценки геологических рисков : дис. в виде науч. докл. ... д-ра геол.-минералог. наук : 04.00.07 / А. Л. Рагозин ; НИИ по инж. изысканиям в стр.-ве. – М. : 1997. – 60 л.

12. Оценка последствий чрезвычайных ситуаций / Г. Л. Кофф [и др.]. – М. : Изд.-полигр. комплекс РЭФИА, 1997. – 364 с.

13. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Экспертная оценка уровня безопасности и риска аварий гидротехнических сооружений. Общие положения : ГОСТ Р 22.2.09-2015. – Введ. 01.06.2016. – М. : Стандартиформ, 2016. – 27 с.

14. Круглов, Г. Г. Результаты натурных обследований гидротехнических сооружений водохранилища «Заславское» и мероприятия по предотвращению их разрушения фильтрационным потоком / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. – 2015. – № 1 (73). – С. 160–165.

15. Круглов, Г. Г. Как оценить опасность водохранилища / Г. Г. Круглов, В. В. Ивашечкин, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. – 2016. – № 1 (75). – С. 32–38.

16. Круглов, Г. Г. Опыт натурных обследований гидроузлов неэнергетического назначения и малых ГЭС с целью их восстановления / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Строительная наука и техника. – 2008. – № 6. – С. 92–94.

17. Ивашечкин, В. В. Оценка опасности Тетеринского водохранилища на реке Друть Круглянского района Могилевской области / В. В. Ивашечкин, В. В. Веремеюк, Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич, О. А. Мурашко, И. В. Недашковская // Вест. ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 1. – С. 62–71.

18. Круглов, Г. Г. Исследование технического состояния судоходной плотины гидроузла «Стахово» Лунинецкого района Брестской области / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. – 2018. – № 4 (86). – С. 31–37.

19. Круглов, Г. Г. Исследование технического состояния шлюза-регулятора на реке Лань / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. – 2020. – № 2 (92). – С. 17–24.

20. Круглов, Г. Г. Фильтрация в обход подпорных гидротехнических сооружений / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич, О. В. Немеровец // Наука и техника. – 2020. – Т. 19, № 3. – С. 252–257.

21. Богославчик, П. М. Оценка надежности и степени риска возникновения аварий на шламохранилищах 4-го РУ ОАО «Беларуськалий» / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 4. – С. 292–297.

22. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : Закон Респ. Беларусь, 5 мая 1998 г., № 141-3 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 20.03.2001. – № 2/673.

23. Об утверждении Правил эксплуатации гидротехнических сооружений и устройств для энергетических (гидроэнергетических и теплоэнергетических) нужд : постановление М-ва энергетики Респ. Беларусь, 22 июня 2020 г., № 22 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. – 12.08.2020. – № 8/35696.

24. Техническое состояние зданий и сооружений. СН 1.04.01-2020. – Введ. 23.03.2021. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 66 с.

25. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003 (с изм. N 1) : СП 58.13330.2012. – Введ. 01.01.2013. – М. : Минрегион России, 2012. – 37 с.

Поступила 11 августа 2021 г.

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СИФОННЫХ ВОДОСБОРОВ НА ВЕРТИКАЛЬНОМ ДРЕНАЖЕ

А. И. Митрахович¹, кандидат технических наук

А. П. Майорчик², кандидат технических наук

¹РУП «Институт мелиорации», г. Минск, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Аннотация

Изложены результаты исследований одного из эффективных конструктивных решений вертикального дренажа с сифонными водосборами. Приведены условия их применения, дана конструкция различного вида сифонов и применяемых дренажных скважин. Установлены режимы работы сифонных водосборов, возможные объемы откачки воды из скважин и их радиусы влияния на уровни грунтовых вод. Дана экономическая оценка стоимости их строительства и эксплуатации.

Ключевые слова: сифонный водосбор, вертикальный дренаж, погружной насос, вакуум-насос, динамический уровень, расход скважин.

Abstract

A. I. Mitrakhovich, A. P. Maiorchik

SIPHON CATCHMENTS OPERABILITY ON VERTICAL DRAINAGE

The article presents the results of research on one of the effective design solutions for vertical drainage with siphon catchments. The conditions of their application are given, the design of various types of siphons and used drainage wells is given. Operation modes of siphon catchments, possible volumes of water pumping from wells and their radii of influence on groundwater levels are established. An economic estimate of the cost of their construction and operation was given.

Keywords: siphon catchment, vertical drainage, submersible pump, vacuum pump, dynamic level, flow rate of wells.

Введение

Погодно-климатические условия с высокой температурой воздуха и недостаточными осадками в летний период (особенно в 2020–2021 гг.) негативно отразились на формировании урожая различных культур как на мелиорированных, так и на богарных землях во многих районах Беларуси. Многие мелиоративные осушительно-увлажнительные системы в этот период оказались неспособны проводить увлажнение из-за нехватки или полного отсутствия воды в каналах.

С учетом возможности повторения подобных погодных условий в перспективе следует уделить особое внимание разработке новых конструктивных решений, которые бы повысили эффективность регулирования водного режима почв в экстремальных климатических условиях. При этом вовсе не исключается применение созданных ранее и апробированных элементов мелиоративных систем.

В 1970–80-х гг., когда «мелиорация была делом всенародным», проводились обширные исследования различных конструкций мелиоративных систем, в том числе совершенных осушительно-увлажнительных на базе вертикального дренажа с использованием подземных вод из скважин на орошение. Применение таких систем возможно лишь в определенных гидрогеологических условиях, аналогичных региону Полесья с неглубоким залеганием водоносного горизонта. Более чем двадцатилетний опыт эксплуатации систем вертикального дренажа на опытно-производственных участках площадью 1350 га показал их эффективность при регулировании водного режима почв путем осушения-орошения [1]. Существенным недостатком таких систем была более высокая стоимость по сравнению с открытой осушительной сетью. Это обуславливалось применением основных конструктивных элементов (трубчатые колодцы, насосные станции над скважиной и др.), взятых из проектов систем водоснабжения. Испытания

построенных систем позволили разработать мероприятия по снижению стоимости их строительства и эксплуатации. Проведенные расчеты

Основные результаты исследований

Сифонные водосборы представляют собой систему трубопроводов, соединяющих между собой дренажные скважины. В одной из скважин установлен погружной насос, который забирает воду из других скважин за счет создания в соединительных трубопроводах вакуума.

Таким образом, сифонные водосборы расширяют технические возможности вертикального дренажа. На практике они применялись в разных вариантах и в гидротехнических сооружениях, и в водоснабжении, в промышленном и городском строительстве [2, 3]. Есть данные и об опыте 25-летней эксплуатации вертикального дренажа с сифонным береговым водоотводом, построенным для защиты городской территории от подтопления подземными водами от существующего водохранилища [4]. В большинстве случаев это были довольно сложные дорогостоящие сооружения, поэтому для применения сифонов на мелиоративных системах вертикального дренажа были разработаны более упрощенные конструкции сифонов. Испытание их работоспособности и эффективности проводилось на участках опытно-производственной системе вертикального дренажа мелиоративного объекта Полесской опытной мелиоративной станции (ПОМС) в Лунинецком р-не Брестской обл. Это был осушенный участок, который представлял собой низинное болото с мелкозалежным торфяником глубиной 0,3–0,8 м, подстилаемым мощными водоносными песками со средним коэффициентом фильтрации 17,5 м/сут. и водопроницаемостью 570–700 м²/сут. На этой системе были построены три сифонных водосбора разной конструкции, схемы которых приведены на рис. 1–3.

Сифонный водосбор № 1 (рис. 1). В его состав входят: вертикальная всасывающая труба, обеспечивающая забор воды из скважины № 1 без насоса; сифонный трубопровод (средняя ветвь); нисходящая вертикальная труба в приемной скважине № 2; зарядное устройство (вакуумный насос, или эжектор). В приемной скважине установлен погружной насос ЭЦВ 12-255-30. Средняя ветвь сифона, соединяющая скважины № 1 и № 2 с расстоянием между ними 135 м, выполнена из стальных труб диаметром 150 мм. Длина восходящей

показали техническую возможность и экономическую целесообразность применения на вертикальном дренаже сифонных водосборов.

и нисходящей ветвей составляла 8 и 9,5 м соответственно. Средняя ветвь сифона уложена с уклоном 0,004 в сторону скважины № 2. На этом сифоне проводилось изучение режимов его работы при разных напорах и влияния длины нисходящей ветви на действие сифона. Одновременно определялась максимальная величина вакуума, которую можно создавать без применения зарядного устройства. Максимальный расход сифона составил 94 м³/сут., а наибольшее понижение динамического уровня в приемной скважине – 11,9 м.

Сифонный водосбор № 2 (рис. 2). Этот сифон соединяет три скважины (№ 1–3). Расстояние между скважинами № 1 и 2 – 365 м, между скважинами № 2 и 3 – 10 м. Скважина № 3 глубиной 36 м и диаметром 300 мм дублирует скважину № 2 глубиной 30 м и диаметром 350 мм. По конструкции сифон № 2 представляет собой трубопровод переменного сечения. Средняя ветвь выполнена из чугунных труб диаметром 300 мм и уложена с переменным по длине уклоном. Горизонтальные участки, соединяющие скважины с чугунным трубопроводом, выполнены из стальных труб диаметром 150 мм. Общая длина средней ветви сифона составляет 470 м. Скважина № 1 глубиной 47 м диаметром 300 мм, оборудованная погружным насосом ЭЦВ 12-255-30, является приемной. Нисходящая ветвь сифона выполнена из стальной трубы диаметром 150 мм длиной 10,5 м.

Сифонные водосборы были построены и на втором участке вертикального дренажа ПОМС (рис. 3) на площади 670 га. Система состояла из 19 дренажных скважин, расположенных относительно равномерно по площади. Пять приемных скважин (№ 1–5) были оборудованы погружными насосами и соединены с остальными скважинами сифонными трубопроводами. Длины сифонных трубопроводов между скважинами № 1–10, № 2–9, № 3–8 составляли 500 м, между скважинами № 1–19, № 2–17 и № 18, № 3–15 и № 16 – 700 м. Проектный уклон сифонов был в пределах 0,001–0,004. Сифоны выполнены из полиэтиленовых труб диаметром 150–200 мм. Удельные дебиты скважин на данных сифонных водосборах приведены в табл. 1.

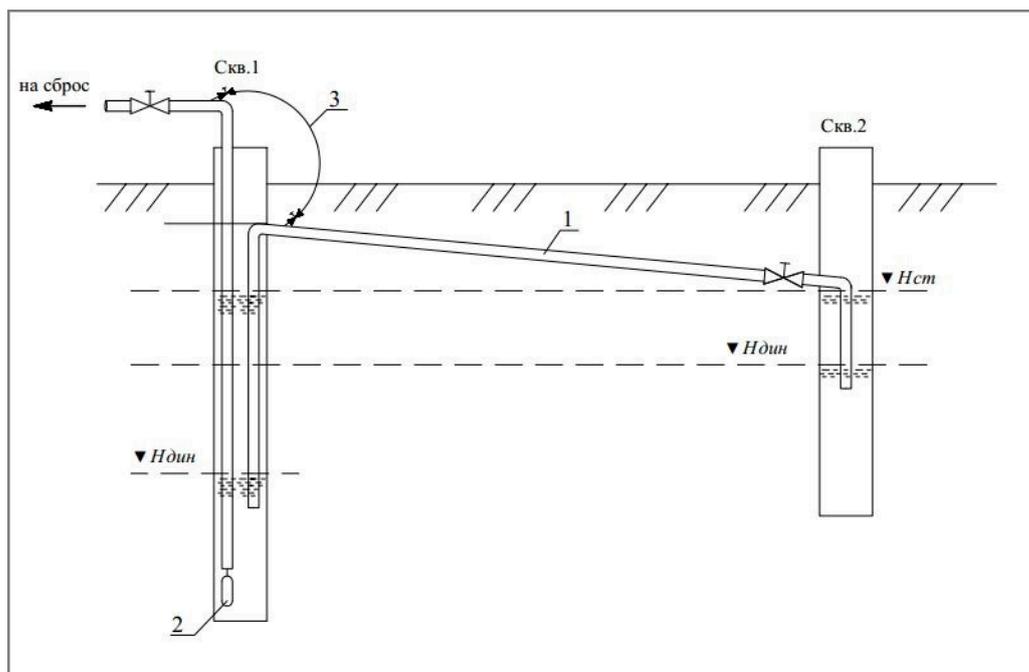


Рис. 1. Схема сифонного водосбора № 1:
1 – сифон; 2 – насос; 3 – зарядное устройство

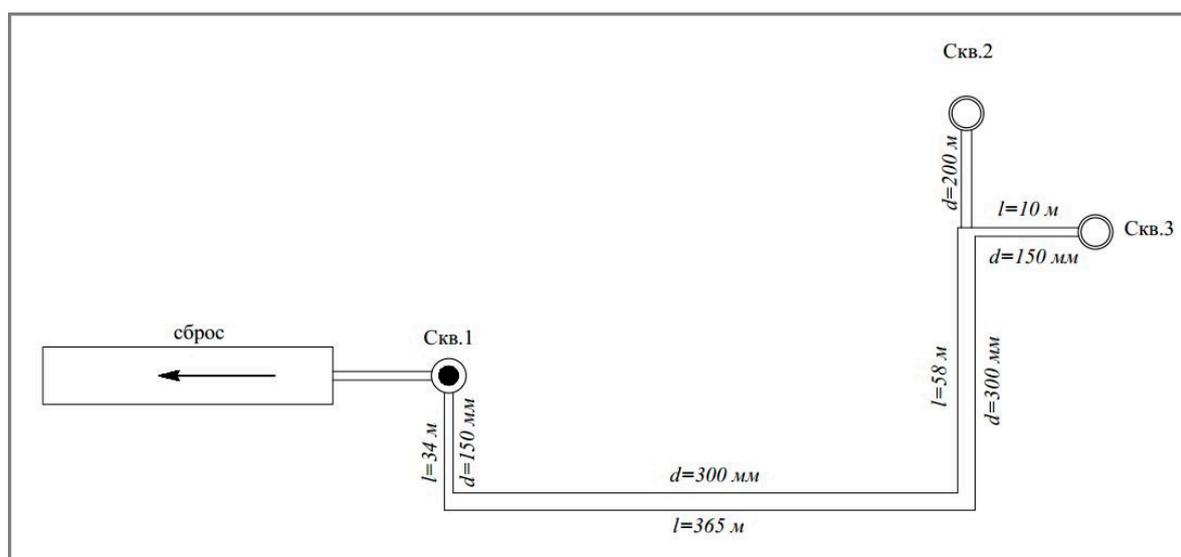


Рис. 2. Схема сифонного водосбора № 2

Таблица 1. Удельные дебиты скважин на данных сифонных водосборах

№ скважин	1	2	3	4	9	15	16	17	18	19	10
Уд. дебит м ³ /ч/м	50	35	40	4	10	9	4	3,5	5	6,5	7

Применение сифонов потребовало разработки новой конструкции приемных скважин. Для размещения трубопровода нисходящего колена сифона и водоподъемного трубопровода насоса верхняя часть скважины на глубину 16 м устраивалась из труб диаметром

630 мм, а диаметр фильтровой колонны был 426 мм. В качестве водоприемной поверхности фильтров применялись волокнисто-пористые полиэтиленовые пластины, изготовленные в БелНИИМиВХ.

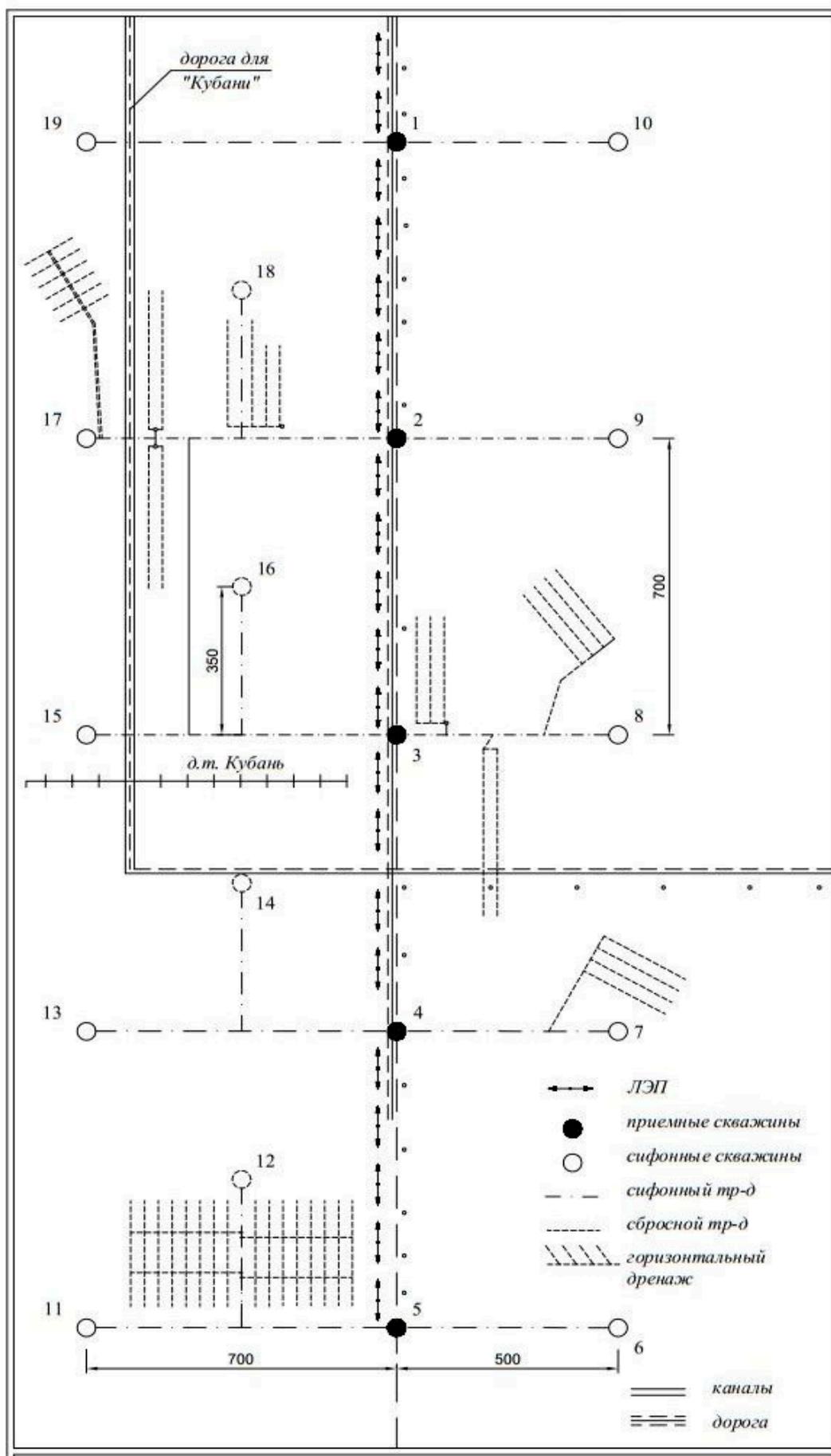


Рис. 3. Схема системы вертикального дренажа ПОМС (2-я очередь)

Для приведения сифона в действие необходимо провести его зарядку, то есть предварительно удалить из трубопровода воздух и создать в нем разрежение, что достигается отсасыванием воздуха вакуум-насосами или непосредственной заливкой водой [5]. Зарядка сифонов на опытных участках проводилась эжектирующим устройством, разработанным нами и не требующим применения вакуум-насосов. Работа сифонов осуществлялась поддержанием определенной разности между динамическими уровнями воды в приемной и водозаборной (сифонной) скважинах.

Устройство сифонного водосбора особенно целесообразно в случае работы скважин на обеспечение подземной водой оросительной техники, когда дебита одной скважины недостаточно. Подключение к одной скважине с насосом одной или нескольких сифонных скважин может существенно увеличить расход и снизить затраты. Режим работы сифонов регулируется изменением динамического уровня в приемной скважине. Расход сифона изменялся в зависимости от понижения динамического уровня в приемной скважине № 1 при работе насоса с различным расходом. При понижении динамического уровня на 11,9 м максимальный расход сифона составил 94 м³/ч. В таком режиме сифон работал нормально, без срывов. Это подтверждается и данными других исследователей о том, что длина нисходящей ветви сифона может превышать 10 м [6, 7]. С другой стороны, не рекомендуется понижать динамический уровень в приемной скважине на более чем половину ее глубины [8].

Предельное превышение сифонного трубопровода над динамическим уровнем воды в заборной (сифонной) скважине (H), с учетом полных потерь напора (по длине трубопровода и в местных сопротивлениях) и создания требуемых скоростей, рекомендуется определять по зависимости:

$$H = 9,4 - \sum h_{\text{сифт}},$$

где $\sum h_{\text{сифт}}$ – потери в сифоне от места входа воды в крайней скважине до места выхода ее в приемной скважине;

9,4 – полученный опытным путем максимальный вакуум в сифоне при работе зарядного устройства. В среднем динамический уровень в заборной (сифонной) скважине можно понизить на 6 м. Исходя из этого рассчитывается и дебит сифонных скважин.

Сифонный водосбор № 2 длиной 470 м испытывался при работе двух и трех скважин. Максимальный расход при работе трех скважин составил 97 м³/ч, минимальный (при котором сифон функционировал еще нормально) был равен 27 м³/ч. При этом скорость воды в трубопроводе диаметром 300 мм составила 0,11 м/с, а в нисходящем колене – 0,40 м/с. В случае работы сифона только из скважины № 2 максимальный расход составил 68 м³/ч при понижении динамического уровня в приемной скважине 10,5 м, в сифонной – 5,5 м. Во всех опытах сифон работал без отсасывания воздуха, но с водяным затвором (нисходящая труба сифона постоянно была заглублена под уровень воды). Данные опыта приведены в табл. 2.

Таблица 2. Режимы работы сифона № 1 (ПОМС)

Вакуум, м. вод. ст	Динамическое понижение, м		Расход Q , м ³ /ч		Скорость V , м/с сифон	Напор H , м $H = S_1 - S_2$
	скв. № 1 S_1	скв. № 2 S_2	сифон	насос		
7,55	8,24	5,31	73	158	1,20	2,93
9,25	10,97	6,24	94	197	1,55	4,73
9,25	11,00	6,26	92	195	1,50	4,85
9,25	11,52	5,48	76	184	1,25	6,06
9,25	11,96	5,01	62	176	1,02	6,95

Устойчивость работы сифонов проверялась при непрерывном действии сифона № 2 в течение 1 и 7 суток с контролем вакуума самописцем. В течение всего времени сифон работал устойчиво. Основным условием такой работы является обеспечение скоростей движения воды в нисходящем колене не ниже 0,7 м/с при обязательном наличии водяного затвора.

При испытании сифонов изучалось осушительное действие вертикального дренажа в зоне действия приемной и сифонных скважин. Построенные по данным наблюдений за уровнем грунтовых вод при откачке кривые депрессии между скважинами № 1–2 сифонного водосбора № 1 имеют пологий характер, образовавшиеся вокруг скважин воронки депрессии невелики. Так, у скважины № 2 в радиусе 2 м УГВ опустился на 2 м от начального. У приемной скважины такое понижение наблюдалось в радиусе 12 м. Уровень грунтовых вод посередине между скважинами № 1–2 (расстояние между ними 365 м) за 6 часов работы трех скважин понизился на 0,3 м, за 24 часа – на 0,42 м. После выключения погружного насоса воронки депрессии исчезли за 1–2 часа и УГВ восстановился на всей площади участка. Влияние одной сифонной скважины № 2 за 24 часа работы с дебитом 67 м³/ч распространилось в радиусе 350 м.

При работе сифонного водосбора с двумя водозаборными скважинами (№ 2–3) и приемной скважиной № 1 и общем дебите 97 м³/ч радиус их влияния увеличился до 520 м со

скоростью понижения УГВ более 5 см за сутки. Неравномерности осушения участка за счет наличия воронок депрессии не наблюдалось.

Экономическая эффективность применения сифонных водосборов обуславливается снижением строительных и эксплуатационных затрат. Так, сифонный водосбор, состоящий из двух скважин, требует строительства лишь одной насосной станции над приемной скважиной и одной камеры из железобетонных колец для размещения оголовка скважины. Затраты на это значительно ниже, чем при оснащении насосным оборудованием двух скважин. Кроме того, за счет применения сифонной скважины существенно экономится электроэнергия. Если средняя продолжительность работы насосных станций на скважинах вертикального дренажа составляет 20 сут. в течение года, то при мощности погружного насоса 22 кВт годовой расход электроэнергии составит 10 560 кВт. Такую экономию даст каждая сифонная скважина. По результатам описанных исследований была разработана методика расчета сифонных водосборов.

Результаты опытов по применению сифонных водосборов позволяют констатировать, что их можно использовать на осушительно-оросительных системах вертикального дренажа. Такие системы способны обеспечивать оросительную технику подземными водами в условиях острого дефицита воды в каналах в засушливые периоды, особенно в регионе Полесья. Эффективным будет также их применение и в противопожарных целях.

Выводы

1. Установлена максимально допустимая величина вакуума при работе сифонного водосбора, определено предельное превышение сифонного трубопровода над динамическим уровнем в заборной скважине.

2. Определены режимы работы сифонов с минимально допустимыми скоростями воды в средней и нисходящей ветвях сифона без отсасывания воздуха.

3. Установлены конструктивные параметры сифонных водосборов, обеспечивающие их надежную работу по отбору воды из скважин.

4. Разработаны новые конструкции водоприемных скважин с переменным диаметром по глубине.

5. Установлены возможность и целесообразность использования сифонных водосборов на осушительно-оросительных системах вертикального дренажа в определенных гидрогеологических условиях.

Библиографический список

1. Осушение земель вертикальным дренажем / А. И. Мурашко [и др.]. – Минск : Ураджай, 1980. – 248 с.
2. Абрамов, С. К. Подземный дренаж в промышленном и городском строительстве / С. К. Абрамов. – М. : Стройиздат, 1973. – 279 с.
3. Оводов, В. С. Сельскохозяйственное водоснабжение и обводнение / В. С. Оводов. – М. : Колос, 1984. – 473 с.
4. Масловский, Е. А. Глубокий дренаж (опыт 25-летней эксплуатации вертикального дренажа с сифонным водоотводом) / Е. А. Масловский, С. К. Абрамов. – М. : Стройиздат, 1964. – 130 с.
5. Временные рекомендации по проектированию вертикального дренажа в Белорусском Полесье / А. И. Мурашко, А. И. Митрахович [и др.]. – Минск : [б. и.], 1978. – 76 с.
6. Ругалева, Н. Н. Новые данные о действии сифонов / Н. Н. Ругалева // Водоснабжение и санитарная техника. – 1958. – № 5. – С. 24–28.
7. Митрахович, А. И. Сифоны на системах вертикального дренажа / А. И. Митрахович, В. Н. Немиро // Мелиорация и вод. хоз-во. Сер. 2. Экспресс-информация. Эксплуатация мелиоративных систем. – М. : ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1977. – Вып. 3. – С. 6–12.
8. Бочеввер, Ф. М. Гидрогеологические расчеты крупных водозаборов подземных вод и водопонижительных установок / Ф. М. Бочеввер. – М. : Гос. изд-во литературы по стр-ву, 1963. – 57 с.

Поступила 12 августа 2021 г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ И ОЦЕНКИ ФАКТОРОВ МНОЖЕСТВЕННОГО ВЛИЯНИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЗОН ЗАЛЕГАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Т. Н. Мыслыва, доктор сельскохозяйственных наук

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Беларусь

Аннотация

Впервые для территории Горецкого р-на Могилевской обл. была выполнена идентификация пространственного распределения зон потенциального залегания подземных вод с использованием в качестве исходных данных дистанционного зондирования Земли и открытых баз геопрограммных данных, а также подходов, основанных на применении попарного сравнения пространственных параметров путем присвоения веса на основе экспертных оценок (МАИ) и вычислении пространственных отношений между зависимой переменной и независимыми переменными в соответствии с оценками, которые назначаются на основании главных и второстепенных факторов (ФМВ). В результате обработки исходных данных созданы 7 тематических слоев с соответствующей им атрибутивной информацией, которым присвоены различные весовые коэффициенты, характеризующие силу их влияния на пополнение запасов подземных вод. Идентификация пространственного распределения запасов подземных вод выполнялась методом взвешенного оверлея с использованием функциональных возможностей набора инструментов «Наложение» ArcGIS 10.5. Результаты исследования могут быть использованы как местными органами государственного управления, так и исследователями для разработки мер по оптимизации управления подземными водными ресурсами с целью их охраны и рационального водопотребления.

Ключевые слова: подземные воды, прогнозирование, ГИС, анализ иерархий, факторы.

Abstract

T. N. Myslyva

USING ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS AND MULTI-INFLUENCING FACTORS IN PREDICTING GROUNDWATER POTENTIAL ZONES

For the first time for the territory of the Gorki district of the Mogilev region, the identification of the spatial distribution of groundwater potential zones was carried out using as the initial remote sensing data and open geospatial databases, as well as approaches based on the use of pairwise comparison of spatial parameters by assigning weights based on expert estimates (AHP) and calculating the spatial relationship between the dependent variable and the independent variables in accordance with estimates that are assigned based on the major and minor factors (MIF). As a result of processing the initial data, seven thematic layers with the corresponding attributive information were created, which have been assigned different weights to characterize the strength of their influence on groundwater recharge. The spatial distribution of groundwater potential zones was identified using tool of Weighted Overlay analysis tool of ArcGIS ArcGIS 10.5. The results of the study can be used by both local government bodies and researchers to develop the measures to optimize the groundwater resources management in order to protect them and provide rational utilization.

Keywords: groundwater, forecasting, GIS, analysis of hierarchies, factors.

Введение

Ресурсы подземных вод относятся к возобновляемым природным ресурсам и имеют важное экологическое и экономическое значение, а эффективное управление такими ресурсами – одна из целей устойчивого развития. Республика Беларусь обладает значительными ресурсами пресных подземных вод, многократно превышающими современные и перспективные объе-

мы их потребления: ежегодно в стране осуществляется добыча свыше 800 млн м³ подземных вод [1]. Однако, как и любые другие природные ресурсы, подземные воды могут истощаться и претерпевать изменения качества. В этой связи актуальным становится определение факторов, влияющих на накопление подземных вод, а также установление зон с различным потенциалом запасов пресных подземных вод.

Идентификация потенциальных зон залегания подземных вод и их картографирование могут быть выполнены посредством применения как наземных, так и подземных (геологических и геофизических) методов исследования [2]. Использование данных дистанционного зондирования и функциональных возможностей геоинформационных систем (ГИС) совместно с методами математического анализа, в частности метода анализа иерархий (МАИ) и оценки факторов множественного влияния (ФМВ), открывают новые возможности для гидрогеологических исследований и позволя-

Основная часть

Целью данного исследования стала идентификация и картографирование пространственного распределения зон потенциального залегания подземных вод с использованием в качестве исходных данных дистанционного зондирования Земли и открытых баз геопространственных данных, а также двух относительно простых подходов, основанных на применении попарного сравнения пространственных параметров путем присвоения веса на основе экспертных оценок (МАИ) и вычислении пространственных отношений между зависимой переменной и независимыми переменными в соответствии с оценками, которые назначаются на основании главных и второстепенных факторов (ФМВ).

ют значительно ускорить и удешевить процесс получения необходимой актуальной геопро- странственной информации [3].

Несмотря на важность выполнения точной оценки прогнозных запасов подземных вод на локальном уровне, внимание отечественных ученых сосредоточено преимущественно на особенностях формирования гидрохимического режима подземных вод, тогда как вопросы оценки их пространственного распределения в пределах отдельных административных районов страны являются недостаточно изученными и требуют дальнейшей разработки.

Для достижения цели исследования предусматривалось решение следующих задач: 1) обработка исходных данных и создание тематических слоев с соответствующей им атрибутивной информацией; 2) оценка потенциала наличия подземных вод с использованием МАИ и ФМВ; 3) выполнение анализа чувствительности факторов, влияющих на пополнение ресурсов подземных вод; 4) объединение и преобразование геопространственных данных, создание результирующего векторного слоя зон с различным потенциалом наличия подземных вод. Общая схема процесса выполнения идентификации потенциальных зон залегания подземных вод, для дельтации которых параллельно использовались метод анализа иерархий и оценка факторов множественного влияния, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема выполнения идентификации потенциальных зон залегания подземных вод

Таблица 1. Источники исходных данных

Тип данных	Источник данных	Формат данных
Цифровая модель рельефа	результаты радарной топографической съемки поверхности земного шара (SRTM), 4-я версия (2018 г.), пространственное разрешение 30 м	цифровой
Плотность водосборной сети		растровый
Типы землепользования	идентифицированы из мультиспектральной сцены <i>Landsat-8</i> , пространственное разрешение 30 м	растровый
Тип почвы	база геоданных гармонизированных почв мира (HWSD) ФАО версии 1.2.1	цифровой
Уклон территории	определен по SRTM в среде <i>ArcGIS</i>	растровый
Наличие локальных разломов (линеаментов)	определено по SRTM в среде <i>ArcGIS</i>	растровый
Геоморфологическое строение территории	[4, с. 66]	цифровой
Геологическое строение территории	[4, с. 41]	цифровой

Для построения производных цифровой модели рельефа (далее – ЦМР) и определения плотности водосборной сети (водотоков) использовалась 4-я версия (2018 г.) данных *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) – радарной топографической съемки поверхности земного шара, произведенной в феврале 2000 г. с помощью специальной радарной системы методом радарной интерферометрии с борта американского челнока *Shuttle* [5]. Морфометрический анализ ЦМР выполнялся с использованием функциональных возможностей набора инструментов модуля «Гидрология» *ArcGIS* версии 10.5. Плотность водосборной сети (F_s), шт/км² определялась как частное от деления количества тальвегов каждого порядка (N_{ij}) на общую площадь территории водосбора (A): $F_s = N_{ij}/A$ [6]. Наличие локальных разломов определяли, используя четыре растровых изображения с отмывкой рельефа, полученных из матрицы высот SRTM, с азимутом и высотой, равными 315 и 45; 200 и 50; 100 и 60; 50 и 90. Плотность линеаментов (L_d), шт/км² определялась как частное от деления общей длины идентифицированных локальных разломов (L_i) на общую площадь территории водосбора (A): $L_d = L_i/A$ [3]. Данные о типах землепользования в пределах исследуемой территории были получены из сцены *Landsat-8*: дата съемки – 11 августа 2018 г.; время съемки – 8 час. 53 мин. 34 сек.; облачность в момент съемки – 0,11 %; система координат – WGS-84; проекция – UTM-36U; уровень обработки – 3С – ортотрансформи-

рованное изображение местности, полученное с использованием наземных опорных точек и цифровой модели рельефа; пространственное разрешение – 30 м.

Для получения информации о типах почв, которыми представлена территория Горецкого р-на, были использованы сведения из базы геоданных гармонизированных почв мира (HWSD) ФАО версии 1.2.1, представляющей собой растровую базу данных с разрешением 30 угловых секунд, включающую более 15 000 различных картографических единиц почвы и объединяющую существующие региональные и национальные обновления информации о почве по всему миру с информацией, содержащейся в Цифровой карте мира ФАО-ЮНЕСКО в масштабе 1:5 000 000. Сведения о геологическом и геоморфологическом строении территории получены посредством векторизации картографических изображений на бумажных носителях, представленных в Национальном атласе Беларуси [4].

Путем использования функциональных возможностей ГИС созданы 7 тематических слоев, которые совместно с соответствующей им атрибутивной информацией использовались для прогноза распространения подземных вод: слой геологического строения территории; слой геоморфологического строения территории; слой плотности локальных разломов (линеаментов); слой уклона поверхности; слой типов почв; слой типов землепользования и слой плотности водосборной сети (рис. 2).

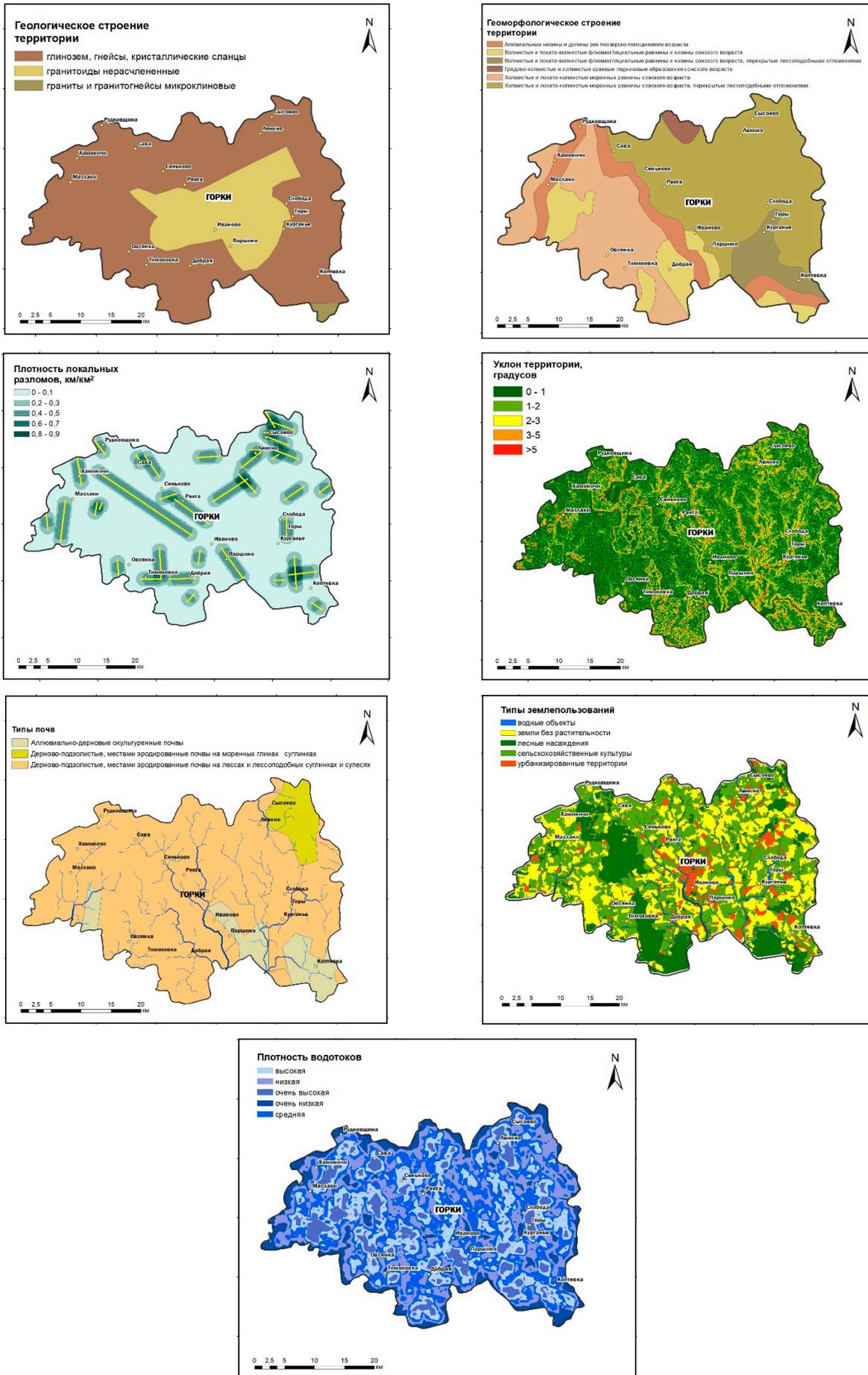


Рис. 2. Тематические слои, использованные для идентификации потенциальных зон залегания подземных вод

Метод анализа иерархий предусматривает рассмотрение проблемы или явления как многоуровневой иерархической структуры, которая учитывает взаимосвязи между ее элементами (факторами) [3, 7]. Каждый элемент иерархии может представлять различные материальные и нематериальные факторы, измеряемые количественные параметры и качественные характеристики, объективные данные и субъективные экспертные оценки [8].

Реализация данного метода при идентификации потенциальных зон залегания подземных вод предусматривала последовательное прохождение следующих этапов: 1) выбор факторов, влияющих на зоны питания подземных вод, и присвоение весов различным тематическим слоям и их соответствующим характеристикам – критериям (построение трехуровневой иерархии «цель – факторы – критерии»); 2) создание матрицы парных сравнений факторов, влияющих на накопление ресурсов подземных вод, ее нормализация и расчет весов каждого фактора; 3) расчет величины относительных суммарных весов факто-

ров, оказывающих воздействие на накопление ресурсов подземных вод, и величины максимального собственного значения вектора согласованности λ_{\max} для ранжирования влияния факторов; 4) оценка согласованности матрицы весов факторов влияния посредством определения величины индекса согласованности CI и коэффициента согласованности CR . Данный метод позволяет объединить и преобразовать геопространственные данные (вход) в результирующий векторный слой зон с различным потенциалом наличия подземных вод (выход), посредством преобразования качественной информации отдельных тематических слоев и функций в количественные оценки по шкале Саати [8]. На первом этапе выполнения МАИ каждому фактору, влияющему на накопление ресурсов подземных вод, было присвоено значение от 1 до 7 в зависимости от его воздействия на изучаемый параметр по сравнению с другими факторами при попарных сравнениях. Для описания относительного влияния параметров использовали стандартную шкалу Саати (рис. 3).

Характер влияния	Равное	Слабое	Умеренное	Сильно умеренное	Сильное	Усиленное	Очень сильное	Наиболее сильное	Чрезвычайное
Шкала влияния	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1/9	1/8 1/7	1/6 1/5	1/4 1/3	1/2 1	2 3	4 5	6 7	8 9
	← Менее важное				Более важное →				

Рис. 3. Шкала оценок относительного влияния факторов по Саати [8]

После присвоения веса значимости каждому из учитываемых факторов строилась матрица парных сравнений [9, 10], в которой столбцы расположены в порядке убывания влияния факторов:

$$A = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & & X_{nn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где A – матрица попарных сравнений, в которой элемент X_{lp} обозначает относительную значимость одного параметра по сравнению с другим параметром.

Первый элемент матрицы получает 1 балл по сравнению с самим собой, а остальные элементы строк заполняются с использованием фактических оценок шкалы Саати, когда более важный параметр сравнивается с менее важным параметром, и обратных величин оценки Саати, когда менее важный параметр сравнивается с более важным (табл. 2).

Геологическое и морфологическое строение территории, а также плотность локальных разломов были определены в качестве факторов, имеющих максимальный вес влияния, тогда как плотность водосборной сети была определена в качестве фактора, наименее влияющего на распределение и пополнение запасов подземных вод. Данное предположение подтверждается и в исследованиях [2, 9, 11].

Чтобы вычислить вес каждого фактора, необходимо построить нормализованную матрицу попарных сравнений. Для этого каждое значение столбца из матрицы парных сравнений следует разделить на его сумму. Вес фактора при этом определяется как среднее арифметическое из значений каждой строки нормализованной матрицы (табл. 3).

Для определения величин относительных весов факторов строилась матрица относительных весов (табл. 4).

Таблица 2. Матрица парных сравнений факторов, влияющих на накопление ресурсов подземных вод

Фактор и его обозначение	ГЕ	ГМ	ПР	УТ	ТП	ТЗ	ПВ
Геологическое строение территории (ГЕ)	1	2	3	4	5	6	7
Геоморфологическое строение территории (ГМ)	1/2	1	2	3	4	5	6
Плотность разломов (ПР)	1/3	1/2	1	2	3	4	5
Уклон территории (УТ)	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4
Тип почвы (ТП)	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3
Тип землепользования (ТЗ)	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2
Плотность водосборной сети (ПВ)	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1
Сумма	2,59	4,45	7,28	11,08	15,83	21,5	28,0

Таблица 3. Нормализованная матрица весов факторов, влияющих на накопление ресурсов подземных вод

Фактор и его обозначение	ГЕ	ГМ	ПР	УТ	ТП	ТЗ	ПВ	Вес фактора, W_i
Геологическое строение территории (ГЕ)	0,386	0,449	0,412	0,361	0,316	0,279	0,250	0,351
Геоморфологическое строение территории (ГМ)	0,193	0,225	0,275	0,271	0,253	0,233	0,214	0,238
Плотность разломов (ПР)	0,127	0,112	0,137	0,181	0,190	0,186	0,179	0,159
Уклон территории (УТ)	0,097	0,074	0,069	0,090	0,126	0,140	0,143	0,105
Тип почвы (ТП)	0,077	0,056	0,045	0,045	0,063	0,093	0,107	0,070
Тип землепользования (ТЗ)	0,066	0,045	0,034	0,030	0,032	0,047	0,071	0,046
Плотность водосборной сети (ПВ)	0,054	0,038	0,027	0,023	0,021	0,023	0,036	0,032
Сумма эффектов	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблица 4. Расчет величины относительных весов факторов, влияющих на накопление ресурсов подземных вод

Фактор и его обозначение	ГЕ	ГМ	ПР	УТ	ТП	ТЗ	ПВ	Относительный вес фактора, W_i
Геологическое строение территории (ГЕ)	0,351	0,476	0,477	0,420	0,350	0,276	0,224	2,574
Геоморфологическое строение территории (ГМ)	0,176	0,238	0,318	0,315	0,280	0,230	0,192	1,749
Плотность разломов (ПР)	0,116	0,119	0,159	0,210	0,210	0,184	0,160	1,158
Уклон территории (УТ)	0,088	0,079	0,080	0,105	0,140	0,138	0,128	0,757
Тип почвы (ТП)	0,070	0,060	0,052	0,053	0,070	0,092	0,096	0,493
Тип землепользования (ТЗ)	0,060	0,048	0,040	0,035	0,035	0,046	0,064	0,327
Плотность водосборной сети (ПВ)	0,049	0,040	0,032	0,026	0,023	0,023	0,032	0,226

Для получения ее значения из каждого столбца ненормализованной матрицы попарных сравнений умножались на значение веса соответствующего фактора W (см. табл. 3), а относительный вес каждого фактора W_i рассчитывался как сумма весов фактора в каждой строке матрицы.

Для подтверждения либо опровержения правильности суждений о влиянии того либо

иного из изучаемых факторов на накопление ресурсов подземных вод в пределах территории интереса была выполнена оценка согласованности матрицы весов факторов влияния. На первом этапе оценки выполнялось определение величины собственного значения вектора согласованности λ_{\max} как частного от деления общего относительного веса каждого фактора W_i на вес соответствующего фактора W (табл. 5).

Таблица 5. Расчет величины собственного значения вектора согласованности λ_{\max}

Фактор и его обозначение	Относительный вес фактора, W_i	Вес фактора, W	Собственное значение вектора согласованности фактора, λ_{\max}
Геологическое строение территории (ГЕ)	2,574	0,351	7,33
Геоморфологическое строение территории (ГМ)	1,749	0,238	7,35
Плотность разломов (ПР)	1,158	0,159	7,28
Уклон территории (УТ)	0,757	0,105	7,21
Тип почвы (ТП)	0,493	0,070	7,04
Тип землепользования (ТЗ)	0,327	0,046	7,10
Плотность водосборной сети (ПВ)	0,226	0,032	7,05
Среднее значение вектора согласованности, λ_{\max}	7,19		

Согласно [8], для подтверждения согласованности матрицы парных сравнений она должна иметь среднее собственное значение λ_{\max} , большее или равное количеству рассматриваемых факторов n . По результатам выполненных расчетов получено главное собственное значение 7,19 для матрицы из 7 факторов, следовательно, условие $\lambda_{\max} \geq n$ выполнено, а матрица парных сравнений является согласованной.

Чтобы оценить общую несогласованность созданной иерархической модели, обуслов-

ленную накоплением погрешностей, связанных с несогласованностью локальных суждений, выполнялся расчет индекса согласованности CI , который определялся по формуле (2), и коэффициента согласованности CR , вычисляемого по формуле (3):

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (2)$$

$$CR = CI / RI, \quad (3)$$

где RI – среднее значение индекса однородности случайным образом составленной матрицы парных сравнений, которое основано на экспериментальных данных (табл. 6).

Таблица 6. Референтные значения индексов случайной несогласованности [8]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Иерархия считается согласованной, если значение CR не превышает уровня 0,1 [7]. В данном исследовании для матрицы из семи переменных RI равен 1,32, а коэффициент согласованности $CR = 0,0239$, что свидетельствует о том, что веса, присвоенные факторам, влияющим на накопление ресурсов подземных вод,

являются согласованными, а иерархическая модель – правильной, детально структурированной и пригодной для выполнения прогноза.

Метод оценки факторов множественного влияния основан на определении пространственных отношений между зависимой переменной и независимыми переменными в соот-

ветствии с оценками, которые назначаются на основании влияния главных и второстепенных факторов. Распределение факторов влияния на главные и второстепенные и их ранжирование выполнено на основании и собственного опыта автора, и данных обзора литературных источников [3, 12, 13]. Факторам, оказываю-

щим значительное влияние на изучаемый параметр (в данном случае потенциал наличия подземных вод), присваивался вес, равный 1,0, факторам, имеющим второстепенное влияние – вес 0,5, а факторам, не оказывающим влияния, – вес 0 (табл. 7).

Таблица 7. Значения основных, второстепенных, совместных эффектов и предполагаемых весов факторов, влияющих на пополнение ресурсов подземных вод

Фактор и его обозначение	Главный эффект, M_3	Второстепенный эффект, V_3	Совместный эффект, S_3	Вес влияющего фактора, W_{M_3}
Геологическое строение территории (ГЕ)	4	1	5	28
Геоморфологическое строение территории (ГМ)	3	0,5	3,5	19
Плотность разломов (ПР)	2	0,5	2,5	14
Уклон территории (УТ)	2	0,5	2,5	14
Тип почвы (ТП)	2	0	2	11
Тип землепользования (ТЗ)	1	0,5	1,5	8
Плотность водосборной сети (ПВ)	1	0	1	6
Всего	15	3	18	100

Совместный эффект влияния при этом определялся как кумулятивная сумма главного и второстепенного эффектов, а вес каждого влияющего фактора устанавливался с использованием следующей формулы [13]:

$$S_3 = ((M_3 + V_3) / \sum(M_3 + V_3)) \times 100 \quad (4)$$

На рис. 4 проиллюстрирована сила взаимосвязей, присутствующих между множеством факторов, непосредственно влияющих на пополнение ресурсов подземных вод.

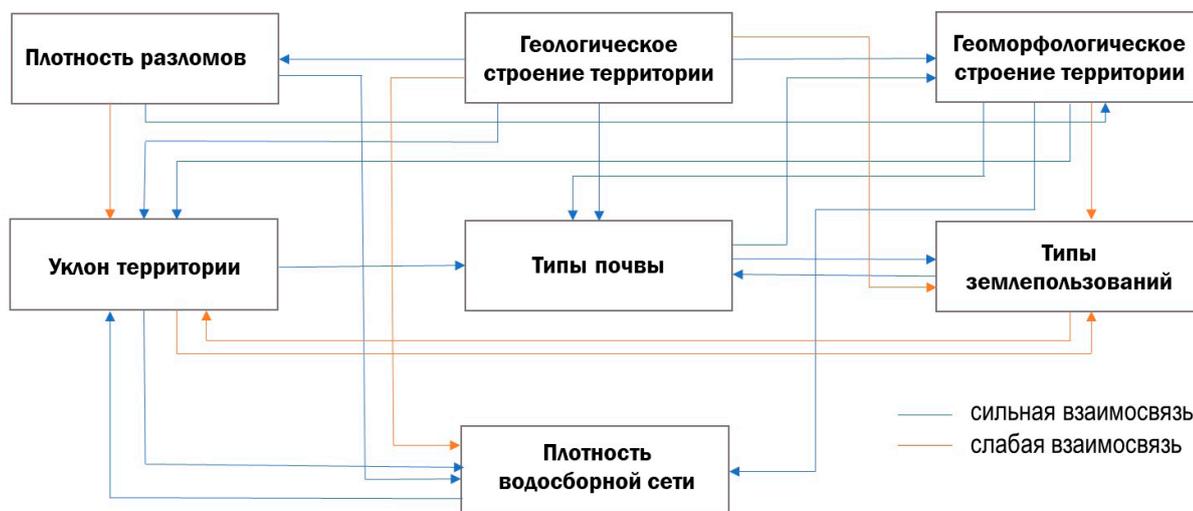


Рис. 4. Взаимосвязь между множеством факторов, влияющих на пополнение ресурсов подземных вод

Идентификация пространственного распределения запасов подземных вод выполнялась методом взвешенного оверлея с использованием функциональных возможностей набора инструментов «Наложение» ArcGIS 10.5 на основе 7 тематических слоев и их соответствующего процентного влияния [14]. Значения пикселей полученных растровых слоев переклассифицировались в общую шкалу оценки потенциала наличия подземных вод: 1 (очень высокий); 2 (высокий); 3 (умеренный) – посредством умножения значений ячеек раstra каждого класса факторов на вес фактора и суммирования полученных значений для создания карты потенциального наличия подземных вод [3, 15]:

$$GWRZ = \sum_{i=1}^n W_i * R_i = (GE_R GE_W + GM_R GM_W + PR_R PR_W + UT_R UT_W + TP_R TP_W + TZ_R TZ_W + PB_R PB_W), \quad (5)$$

где $GWRZ$ – зона с соответствующим потенциалом наличия подземных вод; W_i – вес каждого фактора (тематического слоя); R_i – ранг каждого класса каждого фактора (тематического слоя); индексы R и W относятся, соответственно, к весу фактора (тематического слоя) и рангу класса фактора. Выбор трехступенчатой шкалы оценки был продиктован тем, что территория выполнения исследований не относится ни к аридной, ни к семиаридной зоне.

В табл. 8 представлены окончательные веса факторов, влияющих на пополнение ресурсов подземных вод. Максимальный вес имеет фактор геологического строения территории, определяющий пористость и проницаемость водоносных пород, которые, в свою очередь, влияют на возникновение и распределение подпитки подземных вод. В геологическом отношении территория Горьковского р-на относится к Могилевской мульде проседания Оршанской впадины. Для нее характерно глубокое залегание фундамента – 1250–1400 метров. Литология района исследований представлена глиноземами, гнейсами и кристаллическими сланцами (77 % площади поверхности; 988,38 км²), гранитоидами нерасчлененными (22,3 %; 286,34 км²), гранитами и гранито-гнейсами микроклиновыми (0,7 %; 9,58 км²) с рейтингами, меняющимися от 1 до 3. Зона с умеренным потенциалом подземных вод приурочена к территории с распространением

нерасчлененных гранитоидов, находящейся в центральной части Горьковского р-на. Глубина залегания первого от поверхности водоносного горизонта колеблется от 0,5 до 9 м.

Горьковский район расположен преимущественно в пределах территории Оршанско-Могилевского плато, за исключением северо-восточной части, представленной Горьково-Мстиславской возвышенностью. Преобладающий характер рельефа – волнистая платообразная равнина, сильно расчлененная долинами р. Прони с притоками Поросица, Быстрая, Вербовка и Гальша, р. Баси с притоками Полна, Голубица, Ремествянка, Лебедевка, Днепрец и Мерея, также густой сетью глубоких оврагов и балок с выступающими в ряде мест моренными грядами в виде пологих холмов. Рельеф равнины слагают маломощные рыхлые лессовидные суглинки и супеси. Лессы покрывают водоразделы и склоны повышенных частей территории, лишенной лесной растительности.

Геоморфологические особенности исследуемого региона были разделены на 6 категорий, веса которых меняются от 1 до 6. Максимальным потенциалом наличия подземных вод характеризуются алювиальные низины и долины рек поозерско-голоценового возраста, занимающие 11,1 % (142,41 км²) территории, волнистые и покато-волнистые флювиогляциальные равнины и низины сожского возраста, занимающие 10,9 % (141,12 км²) территории.

Сеть локальных разломов способствует увеличению пористости пород и играет важную роль в движении грунтовых вод и увеличении потенциала их подпитки. Плотность разломов, полученная из ЦМР, созданной по данным матрицы высот SRTM, – индикатор степени трещиноватости подстилающих пород. Высокая плотность линейных элементов всегда указывает на очень высокий потенциал пополнения подземных вод, однако ее низкая частота не обязательно означает очень низкий потенциал перезарядки [3]. В представляемом исследовании линейная плотность была разделена на пять классов с варьированием рейтингов от 1 до 5. В пределах исследуемой территории преобладают линейные элементы с плотностью от 0,0 до 0,1 км/км² (65,06 %; 826,05 км²), относящиеся к категории «очень низкая». Территория

с высокой (0,6–0,7 км/км²) и очень высокой (0,8–0,9 км/км²) плотностью линейных элементов занимает площадь 153,25 км² (11,93 %) и 27,30 км² (2,13 %) соответственно. Преобладающее направление распространения локальных разломов – северо-запад – юго-восток.

Уклон является характеристикой локального и регионального рельефа, влияющей на удержание воды, интенсивность инфильтрации, подпитку водоносного горизонта и движение грунтовых вод. Район исследования был редуцирован на 5 классов уклонов, а именно: очень низкий уклон (0–1°), низкий (0–2°), умеренный (2–3°), высокий (3–5°) и очень высокий (> 5°). В его пределах преобладают территории с очень низким (485,16 км²; 37,78 %) и низким (408,02 км²; 31,77 %) уклонами и высоким потенциалом для подпитки подземных вод. По результатам морфометрического анализа ЦМР было установлено, что площадь эрозионно-опасных земель с крутизной склона выше 3° и невысоким потенциалом подпитки в пределах территории Горьковского р-на составляет более 15 % от его общей площади.

Гранулометрический состав почвы определяет ее инфильтрационную способность и непосредственно влияет на скорость просачивания поверхностных вод в водоносные горизонты и пополнение запасов подземных вод. Согласно почвенно-географическому районированию Республики Беларусь территория Горьковского р-на расположена в Северной (Прибалтийской) почвенной провинции.

Почвенный покров района представлен преимущественно дерново-подзолистыми, местами эродированными почвами, сформировавшимися на лессах и лессовидных суглинках и супесях, а также на моренных глинах и суглинках; в долинах рек распространены аллювиально-дерновые окультуренные почвы. Преимущественная часть территории, на которой проводились исследования, представлена почвами супесчаного гранулометрического состава (1082,76 км²; 84,31 %). Она характеризуется высокой инфильтрационной способностью, а почвы с низкой инфильтрационной способностью сосредоточены в пределах северо-восточной части района и занимают около 6 % территории (76,89 км²).

Землепользование также оказывает определенное влияние на формирование и распределение стока с поверхности. Территории, занятые водоемами, и лесопокрытые площади имеют максимальную способность к накоплению поверхностного стока и пополнению запасов подземных вод, а ранг их веса составляет 5 и 4 соответственно. Довольно высокой инфильтрационной способностью обладают и сельскохозяйственные земли, тогда как территории, находящиеся под застройкой, дорогами и иными объектами инфраструктуры имеют низкую инфильтрационную способность из-за потери проницаемости поверхности. По результатам классификации сцены, полученной с платформы *Landsat-8*, установлено, что большая часть исследуемой территории занята сельскохозяйственными землями (73,0 %; 937,58 км²); второе место по площади занимают лесопокрытые территории (18,88 %; 242,47 км²); сельские и городские поселения занимают 7,11 % (91,37 км²); водные объекты – около 1 % территории (12,89 км²).

Плотность водосборной сети – еще один фактор, влияющий на движение воды и пополнение запасов подземных вод. Участки с высокой плотностью дренажа имеют меньшее влияние на изучаемый параметр, нежели участки с высокой его плотностью. По результатам выполнения комплексного морфометрического анализа в пределах исследуемой территории выделено 5 категорий плотности водосборной сети, ранжированных в возрастающем порядке: очень высокая (9,45 %; 121,39 км²), высокая (22,36 %; 287,19 км²), средняя (31,31 %; 402,18 км²), низкая (25,13 %; 322,72 км²) и очень низкая (11,74 %; 150,83 км²).

Для проверки правильности теоретического предположения о влиянии того либо иного фактора на формирование ресурсов подземных вод был выполнен анализ динамики индекса чувствительности S при удалении одного или нескольких тематических слоев (факторов) из полученного методом взвешенного оверлея растрового изображения [16]:

$$S = 100 (V/N - V'/n) / V, \quad (6)$$

где V и V' – невозмущенный и возмущенный индексы уязвимости соответственно; N и n – количество уровней данных (тематических слоев), используемых для вычисления V и V' .

Таблица 8. Ранги и веса, присвоенные критериям факторов по результатам применения МАИ и ФМВ

Фактор и его обозначение	Критерий фактора	Ранг класса	Метод анализа иерархий (МАИ)			Оценка факторов множественного влияния (ФМВ)		
			вес фактора	вес критерия	общий вес	вес фактора	вес критерия	общий вес
Геологическое строение территории (ГЭС)	Глинозем, гнейсы, кристаллические сланцы	3		1,05			0,84	
	Гранитоиды нерасчлененные	1	0,35	0,35	2,10	0,28	0,28	1,68
	Граниты и гранитогнейсы микроклиновые	2		0,70			0,56	
Геоморфологическое строение территории (ГМС)	Холмистые и покато-холмистые моренные равнины сожского возраста	3		0,72			0,57	
	Аллювиальные низины и долины рек поозерско-голоценового возраста	6		1,44			1,14	
	Волнистые и покато-волнистые флювиогляциальные равнины и низины сожского возраста	5		1,20			0,95	
	Волнистые и покато-волнистые флювиогляциальные равнины и низины сожского возраста, перекрытые лессовидными отложениями	4	0,24	0,96	5,04	0,19	0,76	3,99
	Грядово-холмистые и холмистые краевые ледниковые образования сожского возраста	1		0,24			0,19	
	Холмистые и покато-холмистые моренные равнины сожского возраста, перекрытые лессовидными отложениями	2		0,48			0,38	
Плотность разломов (ПР)	Очень высокая	5		0,80			0,70	
	Высокая	4		0,64			0,56	
	Средняя	3	0,16	0,48	2,40	0,14	0,42	2,10
	Низкая	2		0,32			0,28	
	Очень низкая	1		0,16			0,14	

Окончание табл. 8

Уклон территории (УТ)	0-1	5	0,11	0,55	1,65	0,14	0,70	2,10
	1-2	4					0,56	
	2-3	3					0,42	
	3-5	2					0,28	
	Более 5	1					0,14	
Тип почвы (ТП)	Аллювиально-дерновая окультуренная	3	0,07	0,21	0,42	0,11	0,33	0,66
	Дерново-подзолистая, местами эродированная на лессах и лессовидных суглинках и супесях	2					0,22	
	Дерново-подзолистая, местами эродированная на моренных глинах и суглинках	1					0,11	
Тип землепользования (ТЗ)	Водные объекты	5	0,05	0,25	0,75	0,08	0,40	1,20
	Урбанизированные территории	1					0,08	
	Лесные насаждения	4					0,32	
	Земли без растительности	2					0,16	
	Сельскохозяйственные культуры	3					0,24	
Плотность водосборной сети (ПВ)	Очень высокая	1	0,03	0,03	0,45	0,06	0,06	0,90
	Высокая	2					0,12	
	Средняя	3					0,18	
	Низкая	4					0,24	
	Очень низкая	5					0,30	

Установлено, что наименьшая вариация индекса чувствительности, независимо от метода оценки, связана с одновременным удалением

таких факторов, как плотность водосборной сети, типы землепользования и почвы (табл. 9).

Таблица 9. Результаты выполнения анализа чувствительности удаления факторов, влияющих на пополнение ресурсов подземных вод

Фактор, который учитывался	Среднее значение индекса чувствительности факторов		Стандартное отклонение		Коэффициент вариации	
	МАИ	ФМВ	МАИ	ФМВ	МАИ	ФМВ
ПВ	1,76	1,21	0,44	0,62	25,0	51,2
ПВ + ТЗ	3,97	2,71	0,75	1,02	18,9	37,6
ПВ + ТЗ + ТП	7,20	4,89	1,28	1,63	17,8	33,3
ПВ + ТЗ + ТП + УТ	4,42	5,69	3,13	2,93	29,9	51,5
ПВ + ТЗ + ТП + УТ + ПР	15,67	10,09	5,38	5,04	34,3	50,0
ПВ + ТЗ + ТП + УТ + ПР + ГМ	19,39	13,79	10,84	8,21	55,9	59,5

Довольно низкие значения данного показателя установлены и при удалении таких факторов, как плотность водосборной сети и тип землепользования, что свидетельствует о правильности сделанных предположений об их низком влиянии на изучаемый параметр – прогнозные запасы подземных вод. По результатам анализа можно констатировать, что при ранжировании параметров наиболее низкий ранг следует присвоить не фактору плотности водосборной сети, а типу почвы, поскольку удаление данного фактора из прогнозной модели вызывает наименьшую вариацию индекса чувствительности. Тем не менее проверка гипотезы о минимальном влиянии на пополнение ресурсов подземных вод плотности водосборной сети, типа землепользования и типа почвы в целом подтвердила правильность данного предположения.

Поскольку числовые значения рангов, присвоенные каждому классу каждого фактора, являются, по существу, произвольными, выполнен анализ индекса чувствительности по одному параметру. Такой анализ позволяет сравнить реальный, или «эффективный», и «теоретический» вес каждого фактора и сделать вывод о правильности выдвинутых предположений. Реальный или «эффективный» вес каждого фактора рассчитывается следующим образом [17]:

$$W = 100 * P_r * P_w / V, \quad (7)$$

где P_r и P_w – значение рейтинга и веса для каждого фактора; V – невозмущенный индекс уязвимости.

Результаты выполненного анализа свидетельствуют, что для всех факторов, независимо

от метода, используемого для оценки их влияния, величина «эффективного» веса превышает вес «теоретический» (табл. 10). Однако при этом сохраняется общая тенденция ранжирования факторов, оказывающих сильное и слабое влияние на изучаемый параметр. Исключение составили только факторы, связанные с уклоном поверхности и плотностью разломов, для которых средние значения «эффективных» весов составили 31,03 и 35,76 (МАИ) и 27,15 и 45,51 (ФМВ) соответственно, тогда как по величине «теоретические» весов приоритет принадлежит фактору плотности разломов перед фактором уклона поверхности (МАИ) либо их влияние определяется как равное (ФМВ).

Важно отметить, что, если при анализе чувствительности будут обнаружены значительные расхождения в распределении «эффективных» и «теоретических» весов влияния факторов, необходимо внести соответствующие корректировки и выполнить повторное взвешивание оверлея.

После идентификации зон с различным потенциалом наличия грунтовых вод (на основе оценок и весов 7 тематических слоев) были созданы геоинформационные модели (8) и (9), результаты визуализации которых представлены на рис. 5.

Для метода МАИ:

$$GWRZ = 0,35ГЕ + 0,24ГМ + 0,16ПР + 0,11УТ + 0,07ТП + 0,05ТЗ + 0,03ПВ; \quad (8)$$

для метода ФМВ:

$$GWRZ = 0,28ГЕ + 0,19ГМ + 0,14ПР + 0,14УТ + 0,01ТП + 0,08ТЗ + 0,06ПВ. \quad (9)$$

Таблица 10. Результаты выполнения анализа индекса чувствительности по одному параметру

Неучитываемый фактор	Рассчитанные эффективные веса								Присвоенные теоретические веса	
	минимальное значение		максимальное значение		среднее значение		стандартное отклонение			
	МАИ	ФМВ	МАИ	ФМВ	МАИ	ФМВ	МАИ	ФМВ	МАИ	ФМВ
Геологическое строение территории (ГЕС)	35	28	105	84	84,92	67,94	34,26	27,41	35	28
Геоморфологическое строение территории (ГМС)	48	38	144	114	72,97	57,77	39,73	31,45	24	19
Плотность разломов (ПР)	16	14	80	70	31,03	27,15	19,55	17,10	16	14
Уклон территории (УТ)	11	14	55	70	35,76	45,51	15,39	19,59	11	14
Тип почвы (ТП)	7	11	21	33	12,92	20,31	5,34	8,38	7	11
Тип землепользования (ТЗ)	5	8	25	40	12,30	19,68	5,35	8,56	5	8
Плотность водосборной сети (ПВ)	3	6	15	30	9,17	18,33	3,89	7,97	3	6

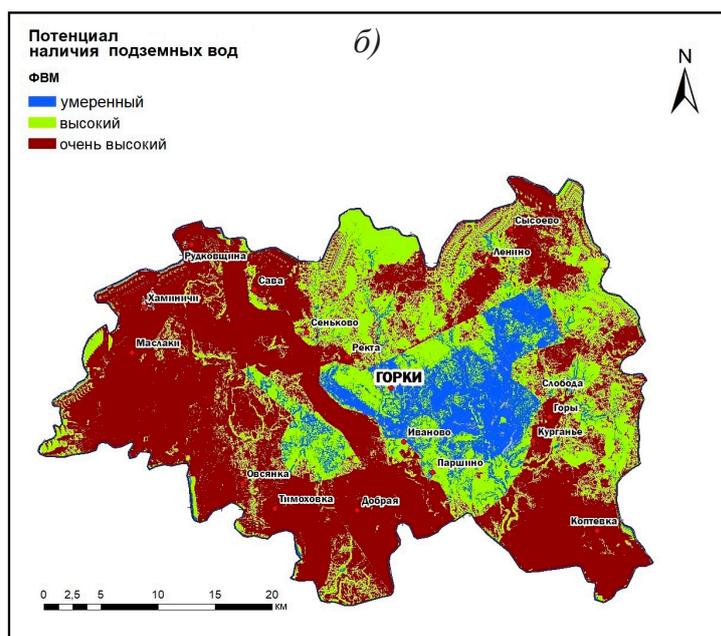
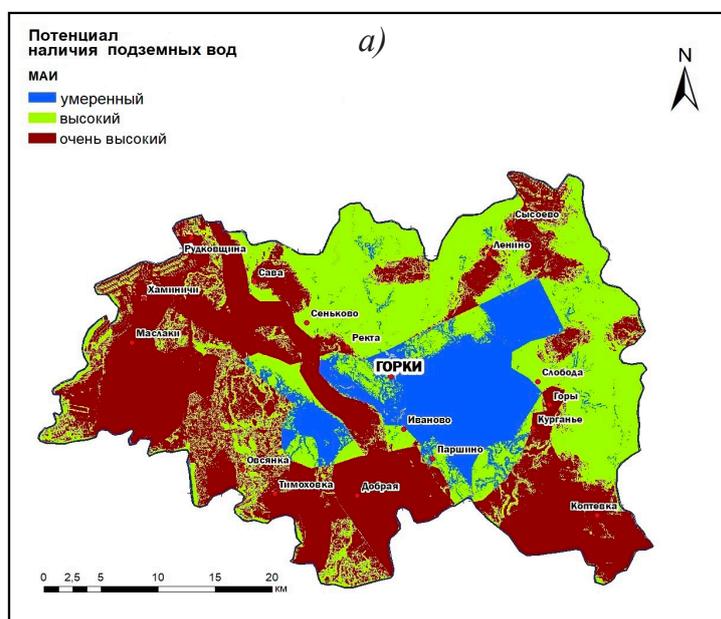


Рис. 5. Зоны с различным потенциалом наличия подземных вод, определенные в пределах Горьковского р-на с использованием метода анализа иерархий (а) и оценки факторов множественного влияния (б)

Независимо от используемого метода идентификации, территории с максимальным потенциалом наличия подземных вод идентифицированы в южной и западной части Горецкого р-на; минимальным потенциалом характеризуется его северо-восточная часть. Следует отметить, что в гидрогеологическом отношении данная территория принадлежит к Оршанскому гидрогеологическому бассейну, а его водоносные комплексы в пределах района приурочены к карбонатным толщам верхнего девона и мела и находятся в зоне застойного водного режима, что является причиной высокой минерализации подземных вод, достигающей 50–100 г/л и более. Основной водоносный горизонт, который может использоваться для водоснабжения, – франский водоносный комплекс, водовмещающие породы которого представлены мергелями, глинами известковистыми, доломитами, песками, песчаниками, доломитизированными известняками.

По информации РУП «Белорусский государственный геологический центр» Департамента по геологии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, на территории Горецкого р-на на водозаборе «Ректа» разведаны и утверж-

дены эксплуатационные запасы пресных подземных вод, применяемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Горки. Кроме того, на территории района функционируют 65 артезианских скважин, вода из которых используется как для производственных целей, так и для хозяйственно-бытового водопотребления. Артезианские скважины, обеспечивающие питьевой водой население г. Горки и района, расположены в населенных пунктах Горы, Добрая, Каменка, Коптевка, Ленино, Маслаки, Матюты, Овсянка, Паршино, Ректа, Рудковщина, Сава, Ходоровка, Чепелинка, Горки, Котелево. На полученных растровых изображениях места расположения участков с очень высоким потенциалом наличия подземных вод полностью соотносятся с месторасположением данных населенных пунктов.

По результатам применения МАИ и геоинформационного анализа, 45,3 % территории Горецкого р-на были отнесены к территориям с очень высоким потенциалом наличия подземных вод; 36,8 % – к территориям с высоким потенциалом; 13,6 % – к территориям с низким потенциалом. Для ФМВ данное соотношение составило 55,4 %, 30,9 % и 13,7 % (рис. 6).

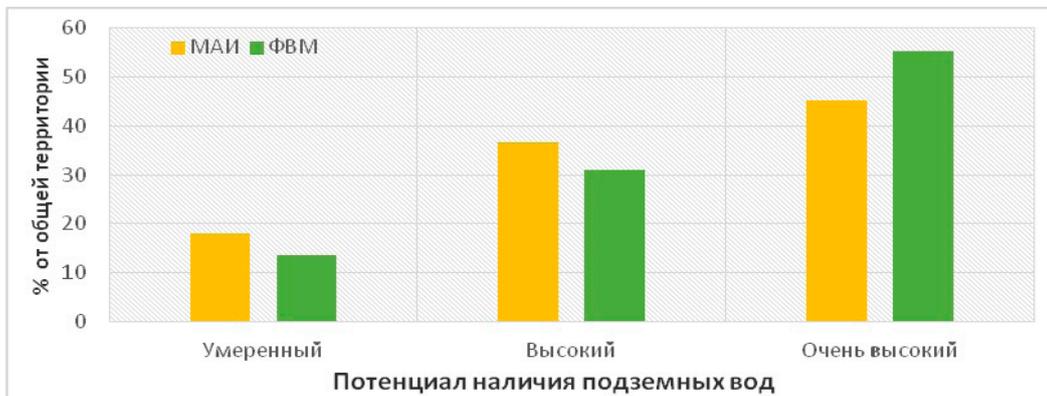


Рис. 6. Распределение площадей зон с различным потенциалом наличия подземных вод на территории Горецкого р-на, идентифицированных различными методами

Заключение

Полученные результаты дают основание утверждать, что совместное использование данных дистанционного зондирования и функциональных возможностей ГИС является эффективным инструментом для прогнозирования потенциальных зон залегания подземных вод без выполнения дорогостоящих гидрогеологических исследований.

Как метод анализа иерархий, так и метод оценки факторов множественного влияния могут быть использованы для прогнозирования потенциальных зон залегания подземных вод, однако МАИ более трудоемок по сравнению с ФМВ. В то же время эмпирические суждения в ФМВ, основанные преимущественно на опыте исследователя, и данные из

литературных источников, которые могут быть субъективными, снижают точность прогнозирования с применением данного метода. Кроме того, МАИ позволяет получить растровое изображение с меньшим количеством «шумов», что непосредственно влияет на качество последующего трансформирования раstra в векторный слой и точность определения площадей искомых зон.

Результаты исследования могут быть использованы как местными органами государ-

ственного управления, так и исследователями для разработки мер по оптимизации управления подземными водными ресурсами с целью их охраны и рационального водопотребления.

Дальнейшие исследования следует сосредоточить в направлении оценки точности полученных геопространственных моделей путем сравнения их с интерполированными поверхностями, созданными по данным глубины эксплуатируемых артезианских скважин в пределах территории Горецкого района.

Библиографический список

1. Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2019 год) / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь; М-во здравоохранения Респ. Беларусь; РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов». – Минск, 2020. – 221 с.
2. Suganthi, S. Groundwater potential zonation by remote sensing and GIS techniques and its relation to the groundwater level in the coastal part of the Arani and Koratalai river basin, Southern India / S. Suganthi, L. Elango, S. K. Subramanian // *Earth Sciences Research Journ.* – 2013. – Vol. 17. – № 2. – P. 87–95.
3. Using analytical hierarchy process and multi-influencing factors to map groundwater recharge zones in a semi-arid Mediterranean coastal aquifer / A. Zghibi [et al.] // *Water.* – 2020. – Vol. 12. – P. 2–27. <https://doi.org/10.3390/w12092525>.
4. Нацыянальны атлас Беларусі / М. У. Мясніковіч [і інш.]. – Мінск : Белкартаграфія, 2002. – 292 с.
5. Дуброва, Ю. Н. Комплексный морфометрический анализ территории Горецкого района с использованием данных дистанционного зондирования Земли / Ю. Н. Дуброва, Т. Н. Мыслыва, Т. Н. Ткачева // *Мелиорация.* – 2020. – № 3 (93). – С. 43–54.
6. Arulbalaji, P. Geospatial tool-based morphometric analysis using SRTM data in Sarabanga Watershed, Cauvery River, Salem district, Tamil Nadu, India / P. Arulbalaji, B. Gurugnanam // *Applied Water Science.* – 2017. – Vol. 7. – P. 3875–3883. <https://doi:10.1007/s13201-017-0539-z>.
7. Hsin-Fu Yeh. GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone /Hsin-Fu Yeh, Cheng-Haw Lee, Kuo-Chin Hsu, Po-Hsun Chang // *Environmental Geology.* – 2008. – Vol. 58. – P. 185–195. <https://doi:10.1007/s00254-008-1504-9>.
8. Saaty, T. L. Relative measurement and its generalization in decision making: why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors / T. L. Saaty // *Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Ser. A. Mathematics.* – 2008. – Vol. 102. – № 2. – P. 251–318. <https://doi:10.1007/BF03191825>.
9. Singh, L. K. Multi-criteria analysis and GIS modeling for identifying prospective water harvesting and artificial recharge sites for sustainable water supply / L. K. Singh, M. K. Jha, V. M. Chowdary // *Journ. of Cleaner Production.* – 2017. – Vol. 142. – P. 1436–1456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.163>.
10. Abrams, W. Delineation of groundwater potential (GWP) in the northern United Arab Emirates and Oman using geospatial technologies in conjunction with Simple Additive Weight (SAW), Analytical Hierarchy Process (AHP), and Probabilistic Frequency Ratio (PFR) techniques / W. Abrams, E. Ghoneim, R. Shew, T. A. LaMaskin // *Journ. of arid Environments.* – 2018. – Vol. 157. – P. 77–96. [Doi:10.1016/j.jaridenv.2018.05.005](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.05.005).

11. Periyasamy, M. Application of geospatial techniques in delineating groundwater potential zones: a case study from South India / M. Periyasamy, A. Subbaiyan, E. Lakshmanan, P. Thirumorthy // *Arabian Journ. of Geosciences*. – 2019. – Vol. 12 (151). – P. 2–15. Doi:10.1007/s12517-019-4289-0.
12. Raju, T. Assessment of groundwater potential zones using multi-influencing factor (MIF) and GIS: a case study from Birbhum district, West Bengal / T. Raju, R. Thapa, S. Gupta, Sh. Guin, H. Kaur // *Applied Water Science*. – 2017. – Vol. 7. – P. 4117–4131. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0571-z>.
13. Al-Ruzouq, R. Potential groundwater zone mapping based on geo-hydrological considerations and multi-criteria spatial analysis: North UAE / R. Al-Ruzouq, A. Shanableh, T. Merabtene, M. Siddique, M. Ali Khalil, A. E. Idris, E. Almulla // *Catena*. – 2019. – Vol. 173. – P. 511–524. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.037>.
14. Chatterjee, R. S. Potential groundwater recharge in north-western India vs spaceborne GRACE gravity anomaly based monsoonal groundwater storage change for evaluation of groundwater potential and sustainability / R. S. Chatterjee, P. Pranjal, S. Jally, B. Kumar, V. K. Dadhwal, S. K. Srivastav, Dh. Kumar // *Groundwater for Sustainable Development*. – 2020. – Vol. 10. – Art. 100307. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100307>.
15. Senanayake, I. P. An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques / I. P. Senanayake, D.M.D.O.K. Dissanayake, B. B. Mayadunna, W. L. Weerasekera // *Geoscience Frontiers*. – 2016. – Vol. 7, iss. 1. – P. 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.03.002>.
16. Saidi, S. Sensitivity analysis in groundwater vulnerability assessment based on GIS in the Mahdia-Ksour Essaf aquifer, Tunisia: a validation study / S. Saidi, S. Bouri, H. B. Dhia // *Hydrological Sciences Journ.* – 2011. – Vol. 56, iss. 2. – P. 288–304. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.552886>.
17. Kouros, M. Aquifer vulnerability assessment using GIS and fuzzy system: A case study in Tehran-Karaj aquifer, Iran / M. Kouros, N. Ramin, J. M. Vahid // *Environmental Geology*. – 2009. – Vol. 58. – P. 437–446. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1514-7>.

Поступила 12 августа 2021 г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ мелиорированных земель

УДК 631.61-3.03

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВОВЛЕЧЕНИЯ ЗАЛЕЖНЫХ ЗЕМЕЛЬ В ОБОРОТ

И. Г. Голубев¹, доктор технических наук
А. С. Апатенко², доктор технических наук
Н. С. Севрюгина², кандидат технических наук

¹ФГБНУ «Росинформагротех», г. Москва, Россия
²РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, г. Москва, Россия

Аннотация

На базе анализа динамики реализации стратегических задач приоритетов развития Российской Федерации дана характеристика состояния сельскохозяйственных угодий, отмечена ключевая задача: к концу 2030 г. обеспечить вовлечение в оборот не менее 12 млн га залежных земель. Сформулирована концепция эффективности вовлечения в оборот выбывших сельскохозяйственных угодий. Решение дано в вариативном формате; составлена инфограмма путей достижения планируемых показателей по совокупности рисков ограничений.

Ключевые слова: неиспользуемое сельскохозяйственное угодье, залежная земля, оборот, выявление, модель, вовлечение, риски.

Abstract

I. G. Golubev, A. S. Apatenko, N. S. Sevryugina

THE STATE AND PROSPECTS OF INVOLVING THE DEPOSITS IN CIRCULATION

On the basis of the analysis of the dynamics of the implementation of strategic objectives of the development priorities of the Russian Federation, the state of agricultural land is characterized, a key task is noted: by the end of 2030 to ensure the involvement of at least 12 million hectares of land. The concept of effective involvement in the turnover of retired agricultural land has been formulated. The decision is given in a variable format, an infographic of ways to achieve the planned indicators on a set of risk constraints.

Keywords: unused agricultural land, deposit land, turnover, identification, model, engagement, risks.

Введение

Стратегическим национальным приоритетом, выделяемым в Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации (Указ Президента России от 21 января 2020 г. № 20), является «...повышение качества жизни российских граждан путем гарантирования высоких стандартов жизнеобеспечения» [1]. Достижение поставленной цели реализуется через решение ряда задач, ключевые из которых – восстановление и повышение плодородия земель сельскохозяйственного назначения, предотвращение сокращения площадей земель сельскохозяйственного назначения, рациональное использование таких земель, защита и сохранение сельскохозяйственных угодий от водной и ветровой эрозии и опустынивания.

Значительные изменения в социально-экономическом состоянии страны, появление новых внешних факторов рисков и угроз продовольственной безопасности требуют создания в агропромышленном комплексе на основе современных техники и технологий консолидированного высоконаучного производственного сектора. Вектор устойчивого развития в обеспечении продовольственной безопасности должен быть направлен на расширение производства сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, повышение экспортного потенциала с учетом приоритета самообеспечения государства отечественной сельскохозяйственной продукцией, сырьем и продовольствием.

Решение указанных задач требует системного подхода в части повышения эффективности использования сельскохозяйственных угодий – основного средства сельскохозяйственного производства и важнейшего фактора обеспечения продовольственной безопасности России. В связи с этим приоритетными для развития агропромышленного комплекса страны становятся задачи, направленные на выявление неиспользуемых земель сельскохозяйственных угодий, в первую очередь пашни, и вовлечение их в сельскохозяйственный оборот [2–6].

Цель исследований: формирование концепции вовлечения в оборот выбывших (неиспользуемых) сельскохозяйственных угодий на базе анализа динамики того, как реализуются стратегические задачи приоритетов развития страны.

Материал и методы. Для анализа и обобщения использованы данные Росстата, органов управления АПК субъектов Российской Федерации, Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2019 г., в том числе сайты органов управления АПК субъектов Российской Федерации, другие открытые источники.

Результаты исследований и их обсуждение

В России земельные отношения регулируются следующими нормативными актами:

Земельным кодексом Российской Федерации от 25.10.2001 № 136-ФЗ (ред. от 30.12.2020 г.) (с изм. и доп., вступ. в силу с 10.01.2021), который дает первичные понятия об основных принципах учета и приоритетов охраны земель, регулируя земельные отношения;

Федеральным законом «Об обороте земель сельскохозяйственного назначения» от 24.07.2002 № 101-ФЗ (с изм. и доп. от 06.06.2019 г.), который «...регулирует отношения, связанные с владением, пользованием, распоряжением земельными участками из земель сельскохозяйственного назначения, устанавливает правила и ограничения, применяемые к обороту земельных участков и долей в праве общей собственности на земельные участки из земель сельскохозяйственного назначения – сделкам, результатом совершения которых является возникновение или прекращение прав на земельные участки из земель сельскохозяйственного назначения и доли в праве общей

собственности на земельные участки из земель сельскохозяйственного назначения, определяет условия предоставления земельных участков из земель сельскохозяйственного назначения, находящихся в государственной или муниципальной собственности, а также изъятия их в государственную или муниципальную собственность» (ст. 1).

Минсельхоз России на базе современных цифровых технологий внедрил единую федеральную информационную систему о землях сельскохозяйственного назначения (далее – ЕФИС ЗСН), предназначение которой заключается в обеспечении «актуальными и достоверными сведениями о таких землях, включая данные об их местоположении, состоянии и фактическом использовании» (интерактивная карта представлена на веб-странице Аналитического центра Минсельхоза России (см. официальный сайт министерства: <https://mcxas.ru/>).

На основании имеющихся данных Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии готовит ежегодный Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель Российской Федерации, аналитический центр Минсельхоза России – доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения в Российской Федерации.

Посевная площадь России, визуализация которой представлена на рис. 1 в интерактивном формате, выражена неравномерностью зонирования, с приоритетом в западной части, что логично из-за исторического тяготения населения к территориям благоприятного хозяйствования по природно-климатическим факторам.

Оценивая эффективность использования земель сельскохозяйственного назначения по субъектам Российской Федерации согласно информации аграрного комитета Госдумы, в Смоленской, Тверской, Вологодской, Ярославской, Кировской областях не используется до половины площади пашни [3]. По обобщенной информации субъектов Российской Федерации, по состоянию на 1 января 2020 г. площадь неиспользуемой пашни составила 19,13 млн га, или 16,6 % общей площади пашни и 59,1 % неиспользуемых сельскохозяйственных угодий. Наиболее значительный вклад в распространение неиспользуемой пашни вносят Приволжский, Сибирский и Центральный федеральные округа

(соответственно 26,5, 21,6 и 20,9 % общей площади пашни в стране). В 2019 г. неиспользуемая пашня отсутствовала в Республике Ингушетия, Ставропольском крае, Ненецком, Чукотском и Ямало-Ненецком автономных округах. В 21 регионе, за исключением вышеперечисленных,

доля неиспользуемой пашни не превышает 10 %, в 22 колеблется от 10 до 25 %, в 22 – от 25 до 50 %. Субъекты Российской Федерации, в которых доля неиспользуемой пашни превышает 50 % общей площади пашни в регионе, представлены на рис. 2 [2].

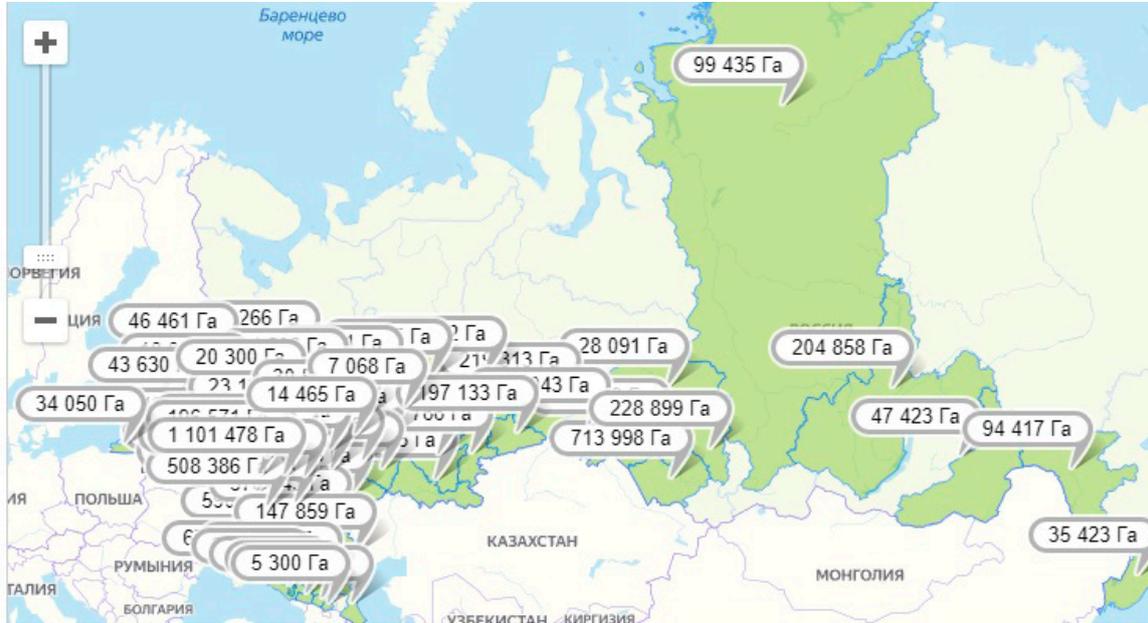


Рис. 1. Посевная площадь России в интерактивном формате (источник: <https://сельхозпортал.рф/analiz-posevnyh-ploshhadej/?area=2>; дата обращения 08.04.2021 г.)

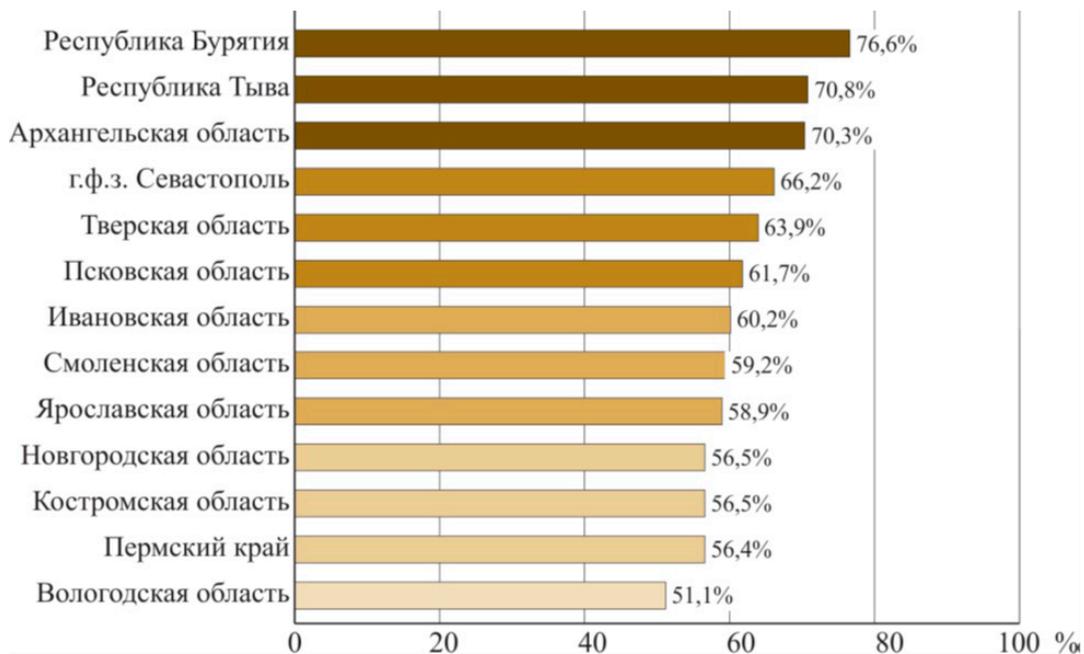


Рис. 2. Субъекты Российской Федерации, в которых доля неиспользуемой пашни превышает 50 % общей площади пашни в регионе [5]

Таблица 1. Распределение вовлеченных сельскохозяйственных угодий в некоторых субъектах Российской Федерации в 2019 г.

Субъект Российской Федерации	Площадь, тыс. га	Для вовлеченных в оборот сельскохозяйственных угодий в 2019 г., %
Алтайский край	6,23	23,5
Ленинградская обл.	4,26	1,4
Новгородская обл.	6,21	1,5
Пензенская обл.	42,09	15,8
Саратовская обл.	65,6	14,4
Нижегородская обл.	20,78	3,8
Тверская обл.	11,39	1,3
Иркутская обл.	22,49	3,4

Таблица 2. Динамика вовлечения в оборот выбывших (неиспользуемых) сельскохозяйственных угодий в некоторых субъектах Российской Федерации за счет проведения культуротехнических работ по федеральным целевым программам [5]

Регион	Вовлечено в оборот, тыс. га			
	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
Российская Федерация, всего, в том числе:	142,7	74	72,5	306
Рязанская обл.	9,4	2,7	3,0	27,0
Тверская обл.	0,6	1,0	1,0	5,2
Ленинградская обл.	2,8	2,0	2,9	2,0
Новгородская обл.	13,6	11,7	11,0	10,4
Астраханская обл.	1,5	1,5	2,7	1,6
Республика Ингушетия	1,0	1,1	0,9	1,0
Чеченская Республика	0,9	0,7	0,9	1,1
Республика Мордовия	0,9	0,9	0,9	9,9
Забайкальский край	8,5	9,0	–	23,0

ВОВЛЕЧЕНИЯ В ОБОРОТ ВЫБЫВШИХ (НЕИСПОЛЬЗУЕМЫХ) СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ



Рис. 3. Технологические мероприятия и технические комплексы обеспечения программы вовлечения в оборот выбывших (неиспользуемых) сельскохозяйственных угодий за счет проведения культуротехнических работ

По данным Минсельхоза России, к концу 2030 г. планируется вовлечь в оборот не менее 12 млн га [3]. Примерами эффективной организации работы по выявлению неиспользуемых земель и их вовлечению в сельскохозяйственный оборот могут служить работы, проведенные в Алтайском крае, Ленинградской, Новгородской, Пензенской, Саратовской областях и др. [2]. Распределение вовлеченных сельскохозяйственных угодий в некоторых субъектах Российской Федерации в 2019 г. показано в табл. 1.

Минсельхоз России разработал проект госпрограммы по эффективному вовлечению земель в оборот и развитию мелиоративного комплекса. К ее реализации рассчитывают приступить с 2022 г. Благодаря ее мероприятиям за 10 лет в оборот планируется ввести не менее 13 млн га сельхозземель. Из них 5 млн га выбывших сельхозугодий будут вовлечены за счет культуртехнических мероприятий с господдержкой [4]. В 2019 г. в рамках ведомственной программы «Развитие мелиоративного комплекса России» и федерального проекта «Экспорт продукции АПК» вовлечено в оборот 324,6 тыс. га выбывших сельскохозяйственных угодий за счет проведения культуртехнических мероприятий (в рамках ведомственной программы – 306,0 тыс. га, федерального проекта – 18,6 тыс. га) с объемом финансирования за счет средств федерального бюджета в размере 1903,4 млн руб. (в рамках ведомственной программы – 1 747,0 млн руб., федерального проекта – 156,4 млн руб.) [2]. Динамика вовлечения в оборот выбывших (неиспользуемых) сельскохозяйственных угодий в Российской Федерации и некоторых ее субъектах за счет проведения культуртехнических работ по федеральным целевым программам «Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2010 годы и на период до 2013 года» и «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы» показана в табл. 2 [5].

На основе анализа состояния мелиоративных систем и мелиорируемых сельскохозяйственных угодий разработана дорожная карта, включающая перечень первоочередных технических мероприятий, направленных на восстановление и улучшение состояния земель (рис. 3) [6, 7].

В основном технологии базируются на применении навесного оборудования, которое агрегируется с тракторами тягового класса

5–10 (К-744Р; 180ТК, К-707Т, Т-701, АТМ-7360 и пр.), для которых характерны высокие удельные энергоемкость, материалоемкость и стоимость работ [8, 9].

Математическая модель контроля эффективности вовлечения в оборот выбывших (неиспользуемых) сельскохозяйственных земель

Для контроля эффективности вложения инвестиций, применяемых технологий и привлекаемых технических средств, введем понятие конкурентный статус территории (далее – КСт), выраженный в форме:

$$\text{КСт} = [(I_T - I_K) / (I_O - I_K)] (S_T / S_O) (C_T / C_O),$$

где I_T – уровень стратегических капитальных вложений в территориальное развитие;

I_O – оптимальный объем капитальных вложений с учетом рисков ограничений;

I_K – критический объем капитальных вложений с учетом рисков ограничений;

S_T, S_O – соответственно действующая и оптимальная стратегия развития территорий;

C_T, C_O – соответственно имеющиеся и оптимальные возможности региона.

Для расчета первый элемент формулы имеет вполне определенное количественное значение, в то время как два других показателя следует рассматривать как среднеарифметические балльные оценки (по шкале от 0 до 1) степени соответствия факторов действующей стратегии или имеющихся возможностей факторам оптимальной стратегии или оптимальным возможностям.

Для определения средневзвешенных оценок стратегии и возможностей соотношений S_T/S_O и C_T/C_O выделены набор типовых факторов и характер их влияния на эффективность вовлечения в оборот выбывших (неиспользуемых) сельскохозяйственных земель. В конечном итоге затратные и экологические риски вовлечения в оборот выбывших (неиспользуемых) сельскохозяйственных земель оцениваются по следующей шкале (рис. 4):

$0 < \text{КСт} \leq 0,4$ – слабая позиция;

$0,5 < \text{КСт} \leq 0,7$ – средняя позиция;

$0,8 < \text{КСт} \leq 1,0$ – сильная позиция.

Установлено три пути реализации концепции вовлечения в оборот выбывших (неиспользуемых) сельскохозяйственных земель:

интенсивный (И) – реализация в кратчайшие сроки при максимальных финансовых вложениях, что малопривлекательно для территорий, расположенных в регионе с рассредоточенной

социальной структурой, и делает данный вариант сложным для исполнения. В то же время не учитывать подобный вариант развития территорий нельзя, так как получение возврата вложений в 2–3-летнем временном периоде можно считать идеальным вариантом;

экстенсивный (Э) – наиболее приемлемый вариант, поскольку доходность станет выше через 5–8 лет, в период реализации проекта. Привлекательность данного варианта в том, что предусмотрено параллельное решение вопроса расширения функционального использования и снижение антропогенной нагрузки на территорию. В данном случае имеется возможность плавного вовлечения природных ресурсов и их восстановления в результате деятельности человека;

комплексный (К) – временной лаг доходности – 3–4 года, что в полной мере отражает экономическую действительность и реальные возможности инвесторов.

Условия достижения оптимального значения коэффициентов

Оптимальное значение коэффициента функционального использования характеризуется 100%-й готовностью к использованию по назначению ($K_{ф.и.} = 1$), что указывает на готовность территории к вовлечению в сельскохозяйственный оборот.

Сейчас региональные территории выбывших (неиспользуемых) сельскохозяйственных земель имеют низшее значение коэффициента

функционального использования – 0,2. При реализации экстенсивного пути развития представляется изменение его значения в следующих пределах: 2022 г. – 0,43; 2027 г. – 0,71 и максимальная загруженность к 2030 г. – 1,0. Видно, что положительная динамика изменения коэффициента функционального использования наблюдается при увеличении значения показателя.

Для *коэффициента антропогенной нагрузки* территории принимается оптимальное значение (100 %) в том случае, если нагрузка обеспечивает баланс между природной средой и хозяйственной деятельностью человека: $K_{ант} = 1$.

Региональные территории, претендующие на возврат в сельскохозяйственный оборот, сейчас находятся в природном комплексе с достаточно высоким значением коэффициента антропогенной нагрузки – 0,6.

При реализации экстенсивного пути развития представляется изменение значения в следующих пределах: 2022 г. – 0,55; 2027 г. – 0,50 и минимальная нагрузка к 2030 г. – 0,4. Данные значения указывают на риски как технических, так и природных ограничений по снижению антропогенной нагрузки территории, что не представляет возможности снижения показателя до оптимального значения – 0,2. Соответственно, положительная динамика изменения коэффициента антропогенной нагрузки территории наблюдается при уменьшении значения показателя.

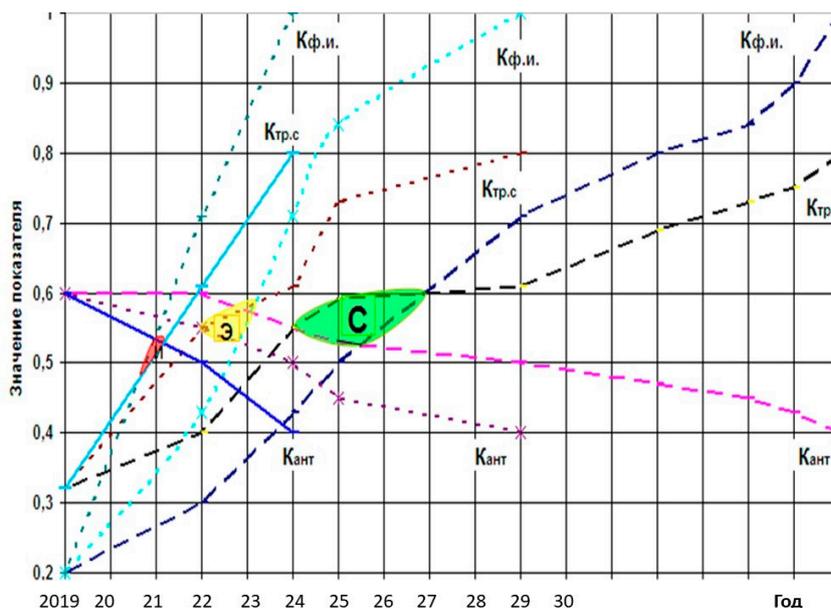


Рис. 4. Расчет пути достижения эффективности вовлечения в оборот выбывших (неиспользуемых) сельскохозяйственных земель по совокупности показателей рискованных ограничений: $K_{ант}$ – коэффициент антропогенной нагрузки территории; $K_{тр.с.}$ – инфраструктурный коэффициент на примере транспортных средств, $K_{ф.и.}$ – коэффициент функционального использования; пути реализации: И – интенсивный; Э – экстенсивный; С – комплексный

Риски реализации дорожной карты в большей мере носят экономический характер, хотя проведение SWOT-анализа на долгосрочном периоде позволяет предложить стратегию минимизации рисков.

Научное сопровождение концепции вовлечения в оборот выбывших (неиспользуе-

мых) сельскохозяйственных земель предполагает на основе использования цифровых технологий создание системы мониторинга региональных территорий в режиме реального времени как дополнительной структуры в ЕФИС ЗСН [10–12].

Выводы

1. По состоянию на 1 января 2020 г. площадь неиспользуемой пашни в стране составила 19,13 млн га, или 16,6 % общей площади пашни и 59,1 % неиспользуемых сельскохозяйственных угодий.

2. Представленная концепция эффективно вовлечения в оборот выбывших (неисполь-

зуемых) сельскохозяйственных земель позволит оптимизировать механизм вовлечения с учетом вариативности сценариев на временном лаге, что обеспечит гармонизированное согласование хозяйственной деятельности с природной идентичностью территории.

Библиографический список

1. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 26 с.

2. Доклад о состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Российской Федерации в 2019 году. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. – 404 с.

3. Минсельхоз внес в правительство проект программы по вовлечению в оборот сельхозземель [Электронный ресурс] // Агроинвестор. – Режим доступа: <https://www.agroinvestor.ru/analytics/news/34784-minselkhoz-vnes-v-pravitelstvo-proekt-programmy-po-vovlecheniyu-v-oborot-selkhozemel>. – Дата доступа: 20.03.2021.

4. Дмитрий Патрушев представил меры по обеспечению плодородия сельхозземель на заседании Президиума Совета законодателей РФ [Электронный ресурс] // М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации. – Режим доступа: <https://mcx.gov.ru/press-service/news/dmitriy-patrushev-predstavil-mery-po-obespecheniyu-plodorodiya-selkhozemel-na-zasedanii-prezidiuma/>. – Дата доступа: 20.03.2021.

5. Агропромышленный комплекс России в 2019 году. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 562 с.

6. Севрюгина, Н. С. Дополнение целевых индикаторов развития АПК: обеспеченность инновационных технологий техническими средствами сопровождения / Н. С. Севрюгина, А. С. Апатенко // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: материалы XII Междунар. науч.-практ. интернет-конф., Москва, 8–10 июня 2020 г. / Росинформагротех. – М., 2020. – С. 491–499.

7. Цифровое сельское хозяйство: состояние и перспективы развития / В. Ф. Федоренко [и др.]. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. – 316 с.

8. Апатенко, А. С. Методы эффективного использования машинно-тракторных агрегатов в мелиорации / А. С. Апатенко // Тр. ГОСНИТИ / ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии. – М., 2013. – Т. 113. – С. 156–160.

9. Апатенко, А. С. Влияние технологических машин на разрушение почвенного покрова / А. С. Апатенко, Н. С. Севрюгина // Чтения академика В. Н. Болтинского : материалы семинара / ФГБОУ ВО РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева, Ин-т механики и энергетики имени В. П. Горячкина, каф-ра «Тракторы и автомобили». – М. : Мегapolis, 2020. – С. 271–276.

10. Цифровая технология мониторинга ландшафтов / И. Г. Голубев [и др.] // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : материалы XII Междунар. науч.-практ. интернет-конф., Москва, 8–10 июня 2020 г. / Росинформагротех. – М., 2020. – С. 254–258.

11. Цифровые технологии для обследования состояния земель сельскохозяйственного назначения беспилотными летательными аппаратами / В. Я. Гольяпин [и др.]. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 88 с.

12. Системы телеметрии и мониторинга сельскохозяйственной техники : аналит. обзор / И. Г. Голубев [и др.]. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 76 с.

Поступила 11 июня 2021 г.

РЕЖИМ ОРОШЕНИЯ ГАЛЕГИ ВОСТОЧНОЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БЕЛАРУСИ

В. А. Волынцева, соискатель

В. И. Бушуева, доктор сельскохозяйственных наук

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Беларусь

Аннотация

Представлен краткий обзор литературы о роли галеги восточной в кормопроизводстве, а также результатов исследований по режимам орошения, проведенных в других странах. Показаны результаты собственных исследований по изучению режимов орошения галеги восточной на дерново-подзолистых почвах в северо-восточной части Беларуси. Установлено, что максимальный биологический потенциал галеги восточной проявляется при регулировании почвенных влагозапасов в пределах 70–100 % наименьшей влагоемкости. Поддержание почвенных влагозапасов в пределах 70–100 % НВ возможно только за счет следующих оросительных норм: для острозасушливого года (P = 5 %) – 90–113 мм; для среднего года (P = 50 %) – 32–37 мм; для года, обильного по увлажнению (P = 90 %), орошение не требуется.

Ключевые слова: галега восточная, режимы орошения, оросительная норма, минимальный межполивной интервал, урожайность сухого вещества.

Abstract

V. A. Volyntseva, V. I. Bushuyeva

IRRIGATION REGIME OF GALEGA ORIENTALIS LAM. IN THE NORTH-EASTERN PART OF BELARUS

The article gives a brief review of literature on the importance of Galega orientalis in fodder production and the results of research on irrigation regimes in other countries. The results of own research on irrigation regimes of Galega orientalis on sod-podzolic soils in the north-eastern part of Belarus are presented. It is established that the maximum biological potential of Galega orientalis is revealed at the regulation of the soil moisture content in the range of 70–100 %. It is possible to keep soil moisture reserves in the range of 70–100 % only applying the following irrigation norms: in a very dry year (P = 5 %) – 90–113 mm; in an average year (P = 50 %) – 32–37 mm; in a humid year (P = 90 %) no irrigation required.

Keywords: Galega orientalis, irrigation regimes, irrigation rate, minimum inter-irrigation interval, dry matter yield.

Введение

Галега восточная – одна из наиболее эффективных многолетних бобовых трав в кормопроизводстве для получения высокобелковых растительных кормов различных видов: свежего зеленого корма, высокопитательного сена, сенажа, силоса и травяной муки. В отличие от клевера лугового и люцерны она может произрастать на одном месте 20 лет и более, ежегодно формируя при этом урожайность зеленой массы от 550 до 750 ц/га и выше. Приготовленная из галеги травяная мука по энергетической и протеиновой питательности приближается к концентратам, а по биологической ценности их превосходит. Включение травяной муки в рацион дойных коров позволяет заменять часть зерновых кормов и повысить удой молока.

У галеги восточной можно ежегодно получать семена урожайностью от 2 до 6 ц/га, максимум до 16 ц/га, что снимает проблему их дефицитности. Возделывание ее в хозяйствах повышает эффективность использования пахотных земель, лугов и пастбищ, улучшает экологию.

Галега восточная восстанавливает структуру почвы, повышает ее плодородие. На участках, где она произрастает на протяжении 4 лет и более, в почве повышается содержание гумуса на 0,12–0,13 %, накапливается до 20 т корневых остатков, в которых содержится свыше 400 кг азота, 110 кг фосфора и около 170 кг калия. Галега является хорошим предшественником в севообороте; прибавка урожайности

яровых культур составляет 10–16 ц/га, картофеля – до 60–80 ц/га, гречихи – до 5–10 ц/га.

Значимость галеги восточной заключается в необычно высокой экономичности ее возделывания, обеспечивающей производство кормовой единицы по самой низкой себестоимости за счет высокой урожайности, энергетической питательности кормов, получаемых из нее, а также продуктивного долголетия.

Галега опыляется пчелами и является самым ранним медоносом. Цветение ее начинается во второй декаде мая. Оплодотворение цветков пчелами обеспечивает рост урожайности семян в 2–3 раза [1–3].

Галега характеризуется высокой экологической пластичностью и может успешно произрастать не только во всех почвенно-климатических зонах Беларуси, но и во многих других странах мира. Сейчас ее возделывают в различных областях, краях и автономных республиках России, на территории всех республик бывшего Советского Союза – на территориях самых различных эколого-географических зон. Она устойчиво закрепилась в Литве, Латвии, Эстонии, а недавно ее начали возделывать в Польше, Венгрии и даже в Японии [1, 3].

Как и другие бобовые культуры, галега восточная требовательна к влаге: ее прихотливость особенно проявляется в первый год жизни – в период прорастания семян и на начальных этапах роста и развития растений, когда идет формирование корневой системы и азотфиксирующих клубеньков. Во второй и последующие годы жизни травостой галеги восточной более требователен к влагообеспеченности при формировании 2-го и 3-го укосов на кормовые цели и при возделывании на семена в фазе бутонизации – начала цветения для повышения плодообразующей способности. Чтобы предотвратить отрицательное влияние дефицита влаги в почве в критические периоды роста и развития травостоев галеги восточной, актуально проведение орошения.

Следует отметить, что вопросы влияния и эффективности орошения на повышение продуктивности галеги восточной в Беларуси не изучались, но есть как практический опыт возделывания культуры, так и факты гибели посевов (особенно в засушливые периоды разных лет жизни травостоев), что указывает на необходимость проведения подобных исследований.

Положительные результаты, полученные российскими учеными, подтверждают эффективность орошения: травостой сохраняется, его урожайность повышается. Например, в Республике Дагестан исследовалось влияние орошения на урожайность галеги восточной на светло-каштановых почвах СПК «Шамхальский» Кировского р-на на сортах Гале и Магистр [4]. Изучались различные предпосевные пороги: 60–65 % НВ, 70–75 % НВ, 80–85 % НВ. Установлено, что самый оптимальный вариант – 80–85 % НВ для обоих сортов, где получена самая высокая урожайность зеленой массы и минимальные коэффициенты водопотребления.

В Республике Башкортостан изучение водопотребления галеги восточной исследовалось на легкоглинистом типичном черноземе с сортом Гале [5]. При проведении работ допускалась сработка влагозапасов до 65 % НВ. В результате проведенного орошения получена прибавка урожайности сена: особенно высокие ее значения зафиксированы при сильной атмосферной засухе в период между 1-м и 2-м укосами, а на контрольном варианте, наоборот, растения были сильно угнетены.

В Нижнем Поволжье анализировалось водопотребление и орошение галеги восточной на светло-каштановых почвах с различными сортами [6, 7]. Изучались нижние границы оптимальной влажности почвы 70 и 80 % НВ. Исследователями установлено, что наиболее оптимальным вариантом оказался 80 % НВ: на нем были получены наивысшая урожайность зеленой массы и наименьший коэффициент водопотребления. Кроме увеличения урожайности зеленой массы, орошение положительно повлияло на азотфиксирующую способность и физиологию растений. В лесостепной зоне Западной Сибири наиболее оптимальным вариантом орошения при возделывании галеги восточной на зеленый корм оказался вариант 70–75 % НВ, а при возделывании на семена – 60–65 % НВ [8]. В Саратовском Заволжье на темно-каштановых почвах из трех вариантов поддержания влажности, включающих 70–100 % НВ, 60–90 % НВ и контроль без орошения, наиболее эффективным в первый год жизни галеги восточной при формировании травостоя оказался вариант 70–100 % НВ, а в последующие годы при возделывании на кормовые цели – 60–90 % НВ [9].

Необходимость изучения орошения галеги восточной в Беларуси возникла в связи с изменением климата. Его характерной особенностью является периодическое повторение засушливых весенне-летних периодов, особенно при закладке посевов в засушливое время, когда они часто полностью погибают, что и

Материалы и методы исследований

Опыты по изучению возделывания галеги восточной в условиях орошения проводились в 2015–2019 гг. в северо-восточной части Беларуси, в УНЦ «Опытные поля БГСХА» «Тушково-1».

Почва опытного участка дерново-подзолистая, легкосуглинистая, подстилаемая с глубины 1 м моренным суглинком. Глубина пахотного слоя почвы 17–22 см. Почва характеризовалась следующими агрохимическими и водно-физическими показателями: гумус – 1,54 %; P_2O_5 – 283,9 мг/кг; K_2O – 239,0 мг/кг; pH_{KCl} – 6,43; плотность сложения для расчетного слоя почвы (0–40 см) – 1,32–1,43 г/см³; наименьшая влагоемкость для расчетного слоя почвы (0–40 см) – 20,0–22,67 % от массы сухой почвы (105,6–127,0 мм).

Объектом исследований служил отечественный сорт галеги восточной Нестерка.

Схема опыта включала следующие варианты:

- 1) без орошения (контроль);
- 2) орошение галеги восточной при снижении влажности почвы до уровня 80 % НВ в слое 0–40 см (в дальнейшем будет именоваться как 80 % НВ);
- 3) орошение галеги восточной при снижении влажности почвы до уровня 70 % НВ в слое 0–40 см (далее – 70 % НВ).

Поддержание почвенной влажности на требуемом уровне для каждого из вариантов увлажнения выполнялось барабанно-шланговой дождевальная установка итальянского производства *Irriland Raptor*. Поливная норма

Результаты исследования и их обсуждение

Метеорологические условия в период вегетации галеги восточной в годы проведения исследований имели существенные различия. Для их более полной характеристики нами использован гидрометрический коэффициент (ГТК), который рассчитывали по формуле Г. Т. Селянинова: $ГТК = \Sigma X / (0,1 \Sigma T)$, где ΣX – сумма осадков за период со среднесуточной

стало одной из причин низких темпов внедрения культуры в производство.

В связи с отсутствием в Беларуси информации по данной проблеме цель наших исследований – изучение режимов орошения галеги восточной в условиях северо-восточной части страны, их эффективности в повышении ее урожайности.

определялась из условий водоудерживающей способности почвы, мощности расчетного слоя почвы и ее наименьшей влагоемкости по формуле А. Н. Костякова [10]. Поливная норма для варианта 80 % НВ составляла 25 мм, а для 70 % НВ – 30 мм. В дальнейшем поливы проводились с учетом почвенных влагозапасов, которые контролировались на протяжении всего вегетационного периода в расчетных слоях 0,3, 0,4 и 0,5 м.

Площадь учетной делянки 115,5 м², повторность 4-кратная. Расположение делянок систематическое. Влажность почвы определялась термостатно-весовым методом, плотность почвы – методом режущего кольца, наименьшая влагоемкость – методом заливных площадок [11]. Исследования биометрических показателей травостоя осуществлялись по традиционным методикам.

Технология возделывания галеги восточной соответствовала данной культуре. Посев проводился беспокровно с нормой высева семян 12 кг/га при 100%-й посевной годности. Глубина заделки семян 1,5 см, ширина междурядий 30,0 см. Семена перед посевом инокулировали микробным препаратом «Ризофос» марки «Галега» из расчета 200 мл на гектарную норму семян [1]. Подкормка посевов минеральными удобрениями в дозе $P_{60}K_{90}$ с последующим боронованием травостоя проводилась в ранневесенний период.

температурой выше 10 °С, мм; ΣT – сумма среднесуточных температур выше 10 °С за то же время, °С.

Этот коэффициент отражает условный баланс влаги и показывает отношение прихода влаги, поступающей в почву в виде осадков, к ее расходу за счет испарения [12]. Для зоны недостаточного увлажнения с традиционным

орошением при ГТК более 1,6 период считают избыточно влажным; если ГТК изменится в пределах 1,3–1,6 – влажным; 1,0–1,3 – слабо-

засушливым; 0,7–1,0 – засушливым; 0,4–0,7 – очень засушливым; менее 0,4 – сухим (табл. 1).

Таблица 1. Отклонение основных метеорологических показателей вегетационных периодов галеги восточной от нормы (2015–2019 гг.)

Годы исследований	Сумма осадков за сезон		Средняя температура воздуха за сезон		Средний дефицит влажности воздуха за сезон		Средний ГТК за сезон (за вегетационный период)
	мм	% от нормы	°С	% от нормы	мб	% от нормы	
2015	277,6	78	15,7	108	6,2	121	1,0
2016	451,2	120	15,2	108	4,7	96	1,53
2017	508,3	131	13,2	97	7,5	153	1,78
2018	402,1	107	15,8	112	6,5	133	1,34
2019	372,1	105	15,3	106	6,3	127	1,49

Анализ полученных результатов ГТК показал, что тепловлагообеспеченность в наших исследованиях значительно различалась по годам. Так, 2015 г. характеризовался как засушливый, 2016, 2018 и 2019 гг. были оптимальными по увлажнению, а 2017 г. – избыточно влажным.

В 2015 г., в период закладки опытов (11 мая 2015 г.), стояла сухая, умеренно теплая погода. Влагозапасы в слое 0–40 см почвы составили лишь 52 % от величины наименьшей влагоемкости. Это послужило весьма благоприятным естественным фоном для оценки эффективности орошения галеги восточной. В послепосевной период, на протяжении трех последующих месяцев, также наблюдался дефицит почвенной влаги, необходимой для нормального роста и развития растений. Так, за первую декаду после посева выпало лишь 1,3 мм осадков, в то время как норма – 17,0 мм. В связи с этим и в соответствии с программой наших исследований на орошаемых вариантах 20 мая 2015 г. были проведены первые поливы нормами 25 и 30 мм. По условиям опыта нижний предел регулирования влажности составлял соответственно 80 и 70 % НВ.

На второй год исследований (2016 г.), оптимальный по увлажнению, после засушливого предыдущего года в начале весенней вегетации травостой галеги восточной в контрольном варианте значительно уступал вариантам с орошением по густоте и темпам отрастания. Выпадение осадков в мае в количестве 117,3 мм обеспечило оптимальные

почвенные влагозапасы, поэтому в июне проведение поливов не потребовалось. Травостой развивался достаточно интенсивно. В июле сумма среднесуточных температур превысила среднемноголетний показатель на 48,1 °С, что способствовало снижению темпов роста и развития травостоя. В связи с этим на обоих вариантах с орошением проведено по два полива. В августе наблюдения за динамикой влагозапасов в почве показали, что при незначительном количестве выпавших атмосферных осадков (на 48,4 мм ниже нормы) потребовались два полива на вариантах 70 и 80 % НВ нормами 30 и 25 мм соответственно. Это позволило провести третий полноценный укос зеленой массы на орошаемых вариантах, который сравнивали с контролем, где травостой не достиг фазы укосной спелости.

Известно, что галега восточная в обычных условиях без орошения, начиная со второго года жизни, формирует, как правило, два полноценных укоса зеленой массы и только в отдельные годы, при теплой погоде и обильном выпадении осадков в августе и сентябре, можно получить третий полноценный укос [1–3]. Таким образом, орошение травостоев галеги восточной может не только обеспечить получение трех полноценных укосов, повысить урожайность, но и продлить сроки пользования высокопитательным зеленым кормом в период вегетации растений.

В 2017 г., отличавшемся повышенным увлажнением, наблюдались следующие особен-

ности в распределении влагозапасов почвы. Так, в начале вегетации почвенные влагозапасы различались по вариантам и составили: в контрольном 89,5 % от НВ, 80 % НВ – 101,4 % от НВ, 70 % НВ – 95,9 % от НВ. При этом в вариантах с орошением рост и развитие травостоя были заметно интенсивнее, что способствовало формированию более высокой урожайности зеленой массы по сравнению с контролем. В начале вегетации из-за ночных заморозков травостой развивался значительно медленнее на всех вариантах, в результате чего фаза укосной спелости наступила на две недели позже по сравнению с предыдущим годом. После первого укоса почвенные влагозапасы на обоих орошаемых вариантах опыта были сработаны до предполивных, поэтому к концу второй декады июня были проведены первые поливы. Но уже в начале июля, сразу после них, началось обильное выпадение осадков, стояла холодная погода. При этом как в варианте 70 % НВ, так и в варианте 80 % НВ влагозапасы сработались до предполивного уровня, что обусловило необходимость второго полива. Однако сложные метеорологические условия позволили выполнить полив только в варианте 70 % НВ, после чего выпало около 18 мм осадков, что исключило необходимость полива на втором орошаемом варианте. Второй укос зеленой массы на всех трех вариантах опыта проводился в первой декаде августа. Сразу после скашивания на варианте 80 % НВ был проведен второй полив. Всего за период вегетации 2017 г. было осуществлено три укоса зеленой массы, при этом более высокая урожайность получена на варианте 70 % НВ.

Оптимальным по увлажнению был 2018 г., и наши исследования осуществлялись уже на сформированном травостое 4-го года жизни. Даже в контрольном варианте после влажного 2017 г., благодаря сформированной корневой системе и способности к разрастанию, образовался более устойчивый травостой. Метеорологические условия в ранневесенний период были весьма благоприятны для роста и развития галеги восточной, в силу чего к концу мая, при наступлении фазы укосной спелости (бутонизации – начала цветения), был проведен первый укос зеленой массы. В целом за вегетационный период сумма среднесуточных температур воздуха составила 2734 °С, а дефи-

цит влажности воздуха – 1129,3 мб, однако их распределение по месяцам отличалось неравномерностью. Например, в мае наблюдались высокая температура воздуха и незначительное выпадение осадков, что привело к резкому истощению почвенных влагозапасов и необходимости проведения 30 и 31 мая первых поливов на вариантах 70 и 80 % НВ поливными нормами 30 мм и 25 мм соответственно. Это значительно стимулировало отрастание отавы после укоса, и к началу второй декады июня на обоих вариантах с дополнительным увлажнением влагозапасы сработались до предполивного порога. При этом большая загруженность дождевальными техниками позволила осуществить полив в варианте 70 % от НВ только к концу рабочего дня. Полив в варианте 80 % НВ, запланированный на 14 июня, был отменен в связи с выпадением 33,4 мм осадков. Во вторую половину месяца и весь июль почва была перенасыщена влагой, а влагозапасы находились в оптимальных пределах, иногда превышая их. Поэтому поливы на обоих орошаемых вариантах больше не осуществлялись. За вегетацию проведено три укоса зеленой массы, и наиболее урожайным, как и в предыдущие годы, оказался вариант 70 % НВ.

В 2019 г., завершающем в наших исследованиях, вегетационный период был оптимален по увлажнению. Сумма среднесуточных температур и дефицита влажности воздуха равнялись 2506,6 °С и 960,4 мб соответственно. Влагозапасы в начале вегетационного периода по вариантам составили: в контрольном – 82 % от НВ; 70 % НВ – 100 % от НВ; 80 % НВ – 81 % от НВ. Третья декада апреля характеризовалась полным отсутствием атмосферных осадков, однако в первой декаде мая прошли обильные дожди (38,2 мм, или 239 % от нормы). Несмотря на практически полное отсутствие атмосферной влаги во второй половине мая, высокая обеспеченность теплом и достаточные после зимы запасы почвенной влаги позволили травостоям галеги восточной уже к концу мая сформировать первый укос зеленой массы. После этого наблюдалось истощение почвенных влагозапасов орошаемых вариантов до уровня 82–76 % от величины наименьшей влагоемкости, что приблизило выполнение первого полива. К пятому году жизни в первом укосе сформировался мощный и

высокорослый травостой галеги восточной высотой более 1,0 м. Засуха, начавшаяся еще в середине мая, продолжилась вплоть до третьей декады июня. Резко возросшее испарение с открытой поверхности почвы окончательно истощило почвенные влагозапасы орошаемых вариантов, и 6–7 июня были проведены первые поливы нормами 30 и 25 мм на вариантах 70 и 80 % НВ соответственно. Они восстановили почвенные влагозапасы до 84,2 % от наименьшей влагоемкости в варианте 70 % НВ и до 92,6 % от наименьшей влагоемкости во втором орошаемом варианте. Неравномерность распределения атмосферных осадков на протяжении всего июня повлияли на сработку почвенных влагозапасов до 67,2 % от наименьшей влагоемкости в варианте 70 % НВ и 84,3 % от наименьшей

влагоемкости на втором орошаемом варианте, что потребовало выполнение второго полива в варианте 70 % НВ. В дальнейшем почвенные влагозапасы в варианте 70 % НВ находились в оптимальных условиях, а в варианте 80 % НВ приблизились к предполивному порогу уже к середине первой декады июля. Однако высокая обеспеченность осадками в полной мере компенсировала недостаток влаги и удерживала их в оптимальных пределах до конца июля.

Недостаток влаги в расчетном слое почвы восполнялся за счет поливов, сроки которых определялись по результатам водобалансовых исследований при снижении влагозапасов до нижнего порога влажности. Режим орошения галеги восточной по годам исследований приведен на рис. 1.

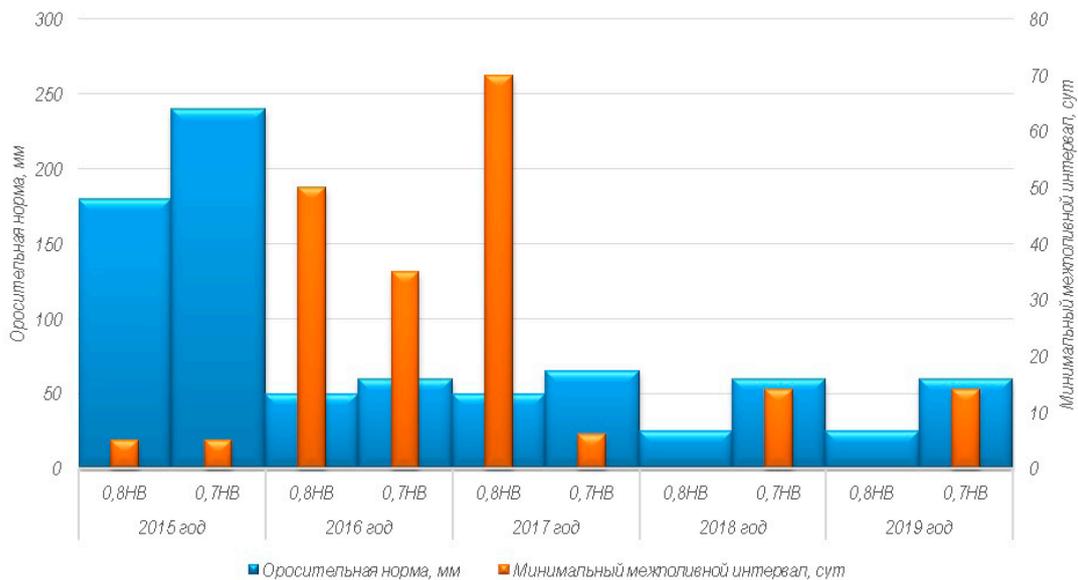


Рис. 1. Оросительная норма и минимальный межполивной интервал за 2015–2019 гг.

При проведении наших исследований в зависимости от тепловлагообеспеченности вегетационных периодов оросительная норма варианта 80 % НВ изменялась: в 2018–2019 гг., оптимальных по увлажнению, – 25 мм; в засушливом 2015 г. – 25–180 мм; на варианте 70 % НВ варьировалась от 60 до 240 мм.

Количество поливов различалось по годам исследований. Так, в засушливом 2015 г., году посева, было выполнено по 8 поливов нормами 20 мм и 30 мм на вариантах 80 и 70 % НВ соответственно. В варианте 80 % НВ в 2016–2017 гг. понадобилось по два полива, а в 2018–2019 гг. – по одному поливу нормой 25 мм. В варианте 70 % НВ потребовалось по

два полива в 2016, 2018, 2019 гг., а в 2017 г. – три полива нормой 30 мм.

Неравномерность распределения атмосферных осадков не только на протяжении исследований вегетационного периода конкретного года, но и по каждому году в отдельности оказывала влияние как на оросительную норму, так и на количество поливов и их минимальный межполивной интервал.

В наших исследованиях лучшим вариантом орошения, обеспечивающим и возможность проведения трех полноценных укосов зеленой массы галеги восточной за период вегетации, и получение более высокой урожайности, является вариант с предполивной

влажностью 70 % НВ, характеризующийся поливной нормой 30 мм. Это связано с биологическими особенностями галеги восточной, которая формирует высокорослый, многостебельный, сильно облиственный куст с мощной корневой системой и высоким транспирационным коэффициентом, хотя для других культур, имеющих меньшую вегетативную массу и менее развитую корневую систему, рекомендуется проводить полив при достижении предполивной влажности почвы 80 % НВ [13].

На основании экспериментальных данных по изучению водопотребления и режима орошения выполнен расчет основных элементов режима орошения. За основу взят стандартный расчет водного баланса для длительного ряда прошлых лет – за период 1965–2019 гг. Расчет выполняли по формуле:

$$W_{\text{к}}^i = W_{\text{н}}^i + K_{\text{п}} \cdot P^i - K_{\text{в}} \cdot E^i - C^i + V_{\text{г}}^i + m \cdot n^i,$$

где $W_{\text{к}}^i$ – влагозапасы расчетного слоя почвы на конец i -й декады, мм;

$W_{\text{н}}^i$ – влагозапасы расчетного слоя почвы на начало i -й декады, мм;

$K_{\text{п}}$ – поправочный коэффициент к осадкомеру;

P^i – измеренные осадки за i -ю декаду, мм;

$K_{\text{в}}$ – коэффициент влагообмена;

E^i – водопотребление культуры за i -ю декаду, мм;

C^i – внутрпочвенный сток атмосферных осадков, выпавших в i -ю декаду и увлажнивших почву сверх равновесного влагосодержания, мм;

$V_{\text{г}}^i$ – подпитывание от уровня грунтовых вод за i -ю декаду (ввиду глубокого залегания уровня грунтовых вод принимается равным 0), мм;

m – поливная норма, мм;

n^i – количество поливов в i -й декаде.

Большая трудоемкость расчетов исключает возможность выполнения их вручную; проектный режим орошения разработан с помощью ПЭВМ и специального алгоритма, составленного сотрудниками мелиоративно-строительного факультета УО БГСХА [14–18]. Результатом расчетов стало установление оросительных норм и минимальных межполивных интервалов при поливной норме 30 мм для опорных метеостанций северо-восточной части страны для различных по тепловлагообеспеченности вегетационных периодов (табл. 2).

Таблица 2. Оросительные нормы (M_p , мм) и минимальные межполивные интервалы (T_{min} сут.) при различной обеспеченности (P , %) для основных метеостанций северо-восточной части Беларуси

Метеостанция	Показатель	Коэффициент вариации (C_v)	Обеспеченность, %					
			5	10	25	50	75	90
$m = 30$ мм								
г. Борисов	M_p	0,59	90	86	58	30	8	–
	T_{min}		17	26	–	–	–	–
г. Витебск	M_p	0,68	90	89	60	30	5	–
	T_{min}		17	19	79	–	–	–
г. Горки	M_p	0,66	113	98	80	37	18	1
	T_{min}		15	17	35	–	–	–
г. Лепель	M_p	0,61	90	76	48	30	9	–
	T_{min}		17	20	–	–	–	–
г. Минск	M_p	0,54	102	95	63	34	2	–
	T_{min}		19	20	87	–	–	–
г. Полоцк	M_p	0,60	95	81	49	30	14	–
	T_{min}		18	42	–	–	–	–
Среднее	M_p	–	97	88	60	32	9	–
	T_{min}		17	24	67	–	–	–

При анализе данных различной обеспеченностей оросительных норм и минимальных

межполивных интервалов при возделывании галеги восточной выявлено, что они достига-

ют следующих значений: для острозасушливого года ($P = 5\%$) – 90–113 мм с минимальным межполивным интервалом в 15–19 суток; для среднего года ($P = 50\%$) – 30–37 мм и 1–2 полива; для обильного по увлажнению года ($P = 90\%$) орошение не требуется.

Оценить, какой из вариантов увлажнения наиболее оптимален, можно только после сравнения урожайности, полученной с орошаемых вариантов опыта и контрольного (табл. 3).

Отличительной особенностью галеги восточной как многолетней бобовой культуры является слабая интенсивность наращивания зеленой массы в год посева. В этот период культура активно формирует корневую систему и дает только один укос зеленой массы. Закладка полевого опыта осуществлена в засушливый год, где в полной мере раскрылось влияние орошения на посевы галеги восточ-

ной. В зависимости от варианта увлажнения прибавка урожайности сухого вещества достигала 2,27 т/га на посевах с нижней границей предполивной влажности 80 % НВ и 3,18 т/га на втором орошаемом варианте. Следует также отметить, что данные прибавки существенны и достоверны ($НСР_{05} = 0,03$ т/га).

В годы хозяйственного использования урожайность сухого вещества колебалась от 6,06–19,95 т/га на контрольном варианте опыта до 13,69–26,14 т/га на орошаемых вариантах, достигая максимальных значений на травостоях с нижней границей предполивной влажности 70 % НВ. Дополнительная влага, поступающая в почву, обеспечивает повышение продуктивности орошаемых земель на 3,31–7,63 т/га и 5,80–8,68 т/га на вариантах 80 и 70 % НВ соответственно.

Таблица 3. Урожайность сухого вещества галеги восточной в 2015–2019 гг.

Варианты увлажнения	Годы	Урожайность сухого вещества, т/га	Прибавка урожая, т/га	
			± к контролю	± 0,7 НВ к 0,8 НВ
Контроль	2015	1,47	–	–
	2016	6,06	–	–
	2017	9,66	–	–
	2018	12,59	–	–
	2019	19,95	–	–
	среднее за 2016–2019 гг.	12,07	–	–
0,8 НВ	2015	3,74	2,27	–
	2016	13,69	7,63	–
	2017	14,33	4,67	–
	2018	17,22	4,63	–
	2019	23,26	3,31	–
	среднее за 2016–2019 гг.	17,13	5,06	–
0,7 НВ	2015	4,65	3,18	0,91
	2016	14,74	8,68	1,05
	2017	15,46	5,8	1,13
	2018	19,97	7,38	2,75
	2019	26,14	6,19	2,88
	среднее за 2016–2019 гг.	19,08	7,01	1,95

$\frac{HCP_{05}}{S_x}$	2015	$\frac{0,03}{0,01}$	–	–
	2016	$\frac{0,63}{0,18}$	–	–
	2017	$\frac{0,39}{0,11}$	–	–
	2018	$\frac{0,46}{0,13}$	–	–
	2019	$\frac{0,77}{0,22}$	–	–

Заключение

Максимальный биологический потенциал галеги восточной раскрывается при регулировании почвенных влагозапасов в пределах 70–100 % НВ. За счет дополнительного увлажнения галеги восточной обеспечивается прибавка урожайности сухого вещества от 3,18 т/га в год посева до 5,8–8,68 т/га в годы хозяйственного использования. Достоверная прибавка отмечается и в варианте 80 % НВ, которая составляет 0,91–2,88 т/га в зависимости от возраста травостоя.

В соответствии с условиями тепловлагообеспеченности вегетационного периода поддержание почвенных влагозапасов в пределах 70–100 % НВ возможно только за счет следующих оросительных норм: для острозасушливого года ($P = 5\%$) оросительная норма соста-

вит 90–113 мм с минимальным межполивным интервалом в 15–19 суток; для среднего года ($P = 50\%$) – 32–37 мм и 1–2 полива; для обильного по увлажнению года ($P = 90\%$) орошение не требуется.

Неоспоримый плюс галеги восточной по сравнению с наиболее распространенными на территории Беларуси клевером луговым и люцерной заключается в ее долголетию. Установлено, что долголетние культуры выходят на пик продуктивности к четвертому-пятому году жизни, что подтверждается и нашими исследованиями. В условиях орошения и без него максимальный сбор сухого вещества галеги восточной отмечен уже к четвертому году хозяйственного использования посевов.

Библиографический список

1. Бушуева, В. И. Галега восточная : монография / В. И. Бушуева, Г. И. Таранухо. – 2-е изд., доп. – Минск : Экоперспектива, 2009. – 204 с.
2. Капустин, Н. К. Теоретические и экспериментальные обоснования новых технологий заготовки травяных кормов с использованием нетрадиционных кормовых культур : монография / Н. К. Капустин. – Минск : БелНИИЖ, 2001. – 253 с.
3. Кшникаткина, А. Н. Козлятник восточный : монография / А. Н. Кшникаткина. – Пенза : РИО ПГСХА, 2001. – 287 с.
4. Мусаев, М. Р. Перспективы выращивания сортов козлятника восточного на орошаемых землях Республики Дагестан / М. Р. Мусаев, А. М. Абасова // Изв. Гор. гос. ун-та. – 2015. – Т. 52, № 4. – С. 399–402.
5. Комиссаров, А. В. Влияние орошения на урожайность козлятника восточного в южной лесостепи Республики Башкортостан / А. В. Комиссаров, А. Р. Мавлютова // Вестн. Алт. гос. аграр. ун-та. – 2012. – № 8 (94). – С. 47–50.
6. Дронова, Т. Н. Суммарное водопотребление и продуктивность нетрадиционной кормовой культуры козлятника восточного на орошаемых землях / Т. Н. Дронова, Н. И. Бурцева, О. В. Головатюк // Изв. Нижневолж. агроуниверсит. комплекса: наука и высш. проф. образование. – 2015. – № 2. – С. 35–39.

7. Дронова, Т. Н. Козлятник восточный на орошаемых землях Нижнего Поволжья / Т. Н. Дронова, Н. И. Бурцева, Е. И. Молоканцева, О.В. Головатюк // Вестн. Рос. акад. с.-х. наук. – 2014. – № 2. – С. 52–54.
8. Коленченко, К. Э. Режим орошения и удобрение козлятника восточного на лугово-черноземных почвах лесостепной зоны Западной Сибири : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : 06.01.02 / К. Э. Коленченко ; Волгогр. гос. с.-х. акад. – Волгоград, 2002. – 15 с.
9. Шаврин, Д. И. Водопотребление козлятника восточного на орошаемых землях Саратовского Заволжья : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02 / Д. И. Шаврин ; Саратов. гос. аграр. ун-т имени Н. И. Вавилова. – Саратов, 2003. – 21 с.
10. Костяков, А. Н. Основные методы орошения в современном ирригационном строительстве / А. Н. Костяков // Избр. тр. : в 2 т. – М. : Сельхозиздат. – 1961. – Т. 1, ч. 1, гл. 4. – С. 271–300.
11. Практикум по почвоведению : учеб. пособие для аграр. спец. с.-х. вузов / под ред. И. С. Кауричева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Колос, 1980. – 272 с.
12. Лосев, А. П. Агрометеорология / А. П. Лосев, Л. Л. Журина. – М. : Колос, 2001. – 297 с.
13. Волынцева, В. А. Водопотребление галеги восточной (*Galega Orientalis Lam.*) при орошении на дерново-подзолистой почве в северо-восточной части Республики Беларусь / В. А. Волынцева, В. И. Бушуева // Мелиорация и вод. хоз-во. – 2021. – № 2. – С. 12–16.
14. Голченко, М. Г. Методика оценки сходства внутривегетационного распределения атмосферных осадков при изучении водного режима почв / М. Г. Голченко // Вестн. Беларус. гос. с.-х. акад. – 2016. – № 1. – С. 87–89.
15. Желязко, В. И. Дождевание многолетних трав стоками свиноводческих комплексов на минеральных почвах Белоруссии : дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02 / В. И. Желязко. – Горки, 1987. – 185 л.
16. Mazhayskiy, Yu. A. Crops water consumption and vertical soil moisture exchange / Yu. A. Mazhayskiy, A. A. Pavlov, O. Miseckaite // Agrofor International Journ. – Vol. 6, iss. 1. – P. 57–64.
17. Вихров, В. И. Ретроспективные расчеты водного баланса почв и неблагоприятных явлений с применением ПЭВМ : лекция для студентов специальности 1-74 05 01 «Мелиорация и водное хозяйство» / В. И. Вихров // Расчет элементов водного баланса и вероятность наступления неблагоприятных водных явлений в условиях естественного водного режима почв. – Горки : УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», 2006. – Ч. 1. – 28 с.
18. Лукашевич, В. М. Водный режим дерново-подзолистых суглинистых почв и его регулирование при дождевании японского проса в условиях северо-восточной зоны Беларуси : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук : 06.01.02. / В. М. Лукашевич; УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия». – Минск, 2016. – 23 с.

Поступила 12 июля 2021 г.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ КАРТОФЕЛЯ И ОВОЩЕЙ, ВЫРАЩИВАЕМЫХ НА АГРОСЕЛИТЕБНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

О. Н. Левшук, аспирант

Т. Н. Мысльва, доктор сельскохозяйственных наук

*УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Беларусь*

Аннотация

На основании собственных экспериментальных исследований выполнена комплексная оценка загрязнения тяжелыми металлами (Cu, Zn, Mn, Pb, Cd,) картофеля и овощей, выращиваемых в пределах территории с индивидуальной жилой застройкой г. Горки. Установлено, что загрязнение овощей и картофеля имеет полиэлементный характер, а доминирующими их загрязнителями являются: для картофеля – Cd; для свеклы столовой и моркови столовой – Zn и Cd; для капусты белокочанной и лука репчатого – Zn; для свеклы столовой – Cu. По способности к биологическому накоплению тяжелые металлы располагаются в следующие ниспадающие ряды: картофель: Cu > Cd > Zn > Pb > Mn; свекла столовая: Cu > Zn > Cd > Mn > Pb; морковь столовая: Cd > Zn > Cu > Pb > Mn; капуста белокочанная и лук репчатый: Zn > Cu > Cd > Pb > Mn. Для моделирования пространственного распределения загрязнения тяжелыми металлами картофеля и овощей использовался метод радиальных базисных функций, с помощью которого определены три зоны с различным уровнем комплексного загрязнения. Посредством применения автоматизированных нейронных сетей из многослойных перцептронов с минимальным и максимальным количеством скрытых нейронов 3 и 10 соответственно созданы модели, позволяющие прогнозировать накопление тяжелых металлов в картофеле и овощах. Результаты исследования могут быть использованы как местными органами государственного управления, так и исследователями для разработки мер по снижению риска для здоровья населения от употребления в пищу загрязненной продукции.

Ключевые слова: *тяжелые металлы, картофель, овощи, загрязнение, прогнозирование.*

Abstract

O. N. Levshuk, T. N. Myslyva

MODELING AND FORECASTING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF HEAVY METALS CONTAMINATION OF POTATOES AND VEGETABLES CULTIVATED IN AGROSETTLE TERRITORY

On the basis of our own experimental studies, a comprehensive assessment of the contamination with heavy metals (Cu, Zn, Mn, Pb, Cd,) of potatoes and vegetables grown within the territory with individual residential buildings in the city of Gorki was carried out. It has been established that the pollution of vegetables and potatoes is of a multi-element nature, and their dominant pollutants are: for potatoes – Cd; for beet and carrot – Zn and Cd; for cabbage and onion – Zn; for beet – Cu. According to their ability to bioaccumulate, heavy metals are arranged in the following descending rows: potatoes: Cu > Cd > Zn > Pb > Mn; beet: Cu > Zn > Cd > Mn > Pb; carrot: Cd > Zn > Cu > Pb > Mn; cabbage and onion: Zn > Cu > Cd > Pb > Mn. The method of radial basis functions, which identified three zones with different levels of complex contamination of potatoes and vegetables with heavy metals, was used to model the spatial distribution of contamination. Models were created to predict the accumulation of heavy metals in potatoes and vegetables by using automated neural networks of multilayer perceptron with a minimum and maximum number of hidden neurons 3 and 10, respectively. The results of the study can be used by both local government bodies and researchers to develop measures to reduce the risk to public health from consuming contaminated food.

Keywords: *heavy metals, potatoes, vegetables, pollution, forecasting.*

Введение

Стратегической целью развития сельского хозяйства Беларуси является формирование конкурентоспособного на мировом рынке и экологически безопасного производства сель-

скохозяйственных продуктов, необходимых для поддержания достигнутого уровня продовольственной безопасности, обеспечения полноценного питания и здорового образа

жизни населения при сохранении плодородия почв [1]. Современная социально-экономическая ситуация и сложившийся традиционный уклад жизни поддерживают высокий интерес населения к пополнению пищевого рациона за счет сельскохозяйственной продукции, выращиваемой в личных подсобных хозяйствах [2]. Валовой сбор картофеля, выращенного в Беларуси в таких хозяйствах в 2019 г., составил 5004,1 тыс. т; в Могилевской обл. – 675,1 тыс. т, овощей 1238,1 тыс. т и 162,1 тыс. т соответственно [3]. Примечательно, что индивидуальным огородничеством и садоводством занимаются как сельские жители, так и городское население, особенно в городах с наличием значительных площадей индивидуальной жилой застройки. Однако качество растениеводческой продукции, получаемой на таких землях, вызывает беспокойство. В Беларуси практически отсутствуют как ее мониторинг (за исключением эпизодических моментов контроля качества на организованных рынках при ее реализации), так и контроль применения минеральных удобрений и средств защиты растений на частных земельных участках, поскольку традиционно контроль со стороны государства осуществляется исключительно над сельскохозяйственными землями. В то же время качество сельскохозяйственной продукции, получаемой в личных подсобных хозяйствах, напрямую зависит от качества почвы, так как она является наиболее чувствительным индикатором эколого-геохимической обстановки территории и локалитетом для депонирования и пересечения путей мигра-

Основная часть

Цель данной работы – выполнение исследований, направленных на оценку уровня и выполнение прогноза пространственного распределения загрязнения тяжелыми металлами (медь, цинк, марганец, свинец, кадмий) картофеля и овощей, выращиваемых населением в пределах индивидуальной жилой застройки г. Горки (Могилевская обл., Беларусь).

Для достижения указанной цели предусматривалось решение следующих задач:

1) определить уровни загрязнения тяжелыми металлами и установить особенности накопления поллютантов картофелем и овощами, выращиваемыми в пределах индивидуальной

жилой застройки агропоселительных территорий г. Горки;

2) применяя функциональные возможности геоинформационных систем, выполнить моделирование и визуализацию пространственного распределения загрязнения картофеля и овощей;

3) путем обучения нейронных сетей построить сложные нелинейные зависимости, позволяющие прогнозировать накопление тяжелых металлов в картофеле и овощах в зависимости от содержания поллютантов в почве, биологических особенностей сельскохозяйственных культур и агрохимических свойств почвы.

ции химических элементов, в частности токсикантов. Однако отнесение почвы к разряду опасно загрязненной, исходя из повышенного содержания в ней тяжелых металлов, еще не значит, что и выращиваемые на ней картофель и овощи будут также иметь высокий уровень загрязнения. Установлено, что растения владеют целым комплексом защитных свойств, в результате чего в органы запаса ассимилянтов попадает ослабленный поток имеющихся в почве в избыточных количествах химических элементов [4], поэтому не всегда на загрязненной почве будет получена такая же продукция. Кроме того, различные овощные культуры способны в разной степени накапливать поллютанты, в зависимости от свойств вещества-загрязнителя, биологических особенностей самого растения, места его произрастания и даже от сорта сельскохозяйственной культуры и генотипов одного и того же вида [5].

Следует отметить, что, несмотря на широкое изучение проблем, связанных с загрязнением окружающей среды тяжелыми металлами, подавляющее большинство подобного рода исследований касается прежде всего оценки уровня загрязнения почвы, растений и иных компонентов ландшафта в мегаполисах и городах с высокой степенью концентрации промышленного производства [6–8]. Исследований по оценке экологического состояния агропоселительных ландшафтов малых городов, значительная часть территории которых представлена индивидуальной жилой застройкой, проведено еще недостаточно.

Исследования выполнялись в 2017–2021 гг. на территории микрорайонов Заречье, Слобода и Академия, а также садовых товариществ

«Труд», «Иваново», «Яблонька», «Верхнее озеро» и «Садовод», находящихся в пределах административной границы г. Горки (рис. 1).



Рис. 1. Схема отбора образцов картофеля и овощей на территории участков индивидуальной жилищной застройки в пределах г. Горки

Отбор проб овощных культур (свекла столовая, морковь столовая, капуста белокочанная, лук репчатый) и картофеля проводился в соответствии с требованиями, указанными в ГОСТ 17.4.3.01-83, ГОСТ 17.4.4.02-84, ГОСТ 28168-89. Пробы товарной продукции отбирались на исследуемых участках по диагонали, через равные расстояния, в трех точках, массой 1 кг каждая.

Перечень приоритетных загрязнителей определен на основании анализа источников, в которых представлены результаты исследований, выполненных на территории Республики Беларусь и других сопредельных государств. Кроме того, проведен разведочный

анализ, в ходе которого дополнительно определялись содержание в растениях никеля, кобальта, молибдена, бора и железа. Однако, поскольку фактические уровни содержания данных элементов в растениях были на несколько порядков ниже предельно допустимых, для дальнейшего определения и изучения выбраны именно Cu, Zn, Pb, Cd и Mn.

Аналитические исследования проводились на базе химико-экологической лаборатории УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», аккредитованной в Системе аккредитации Республики Беларусь в соответствии с СТБ ИСО/МЭК 17025-2007. Определение содержания тяжелых метал-

лов выполнялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии на приборе SOLAAR S Series AA фирмы *Thermo Scientific* (США). Экстрагирование тяжелых металлов выполняли 1н H₂SO₄, минерализацию рас-

тительных проб проводили методом сухого озоления. Информация о статистических характеристиках выборки данных о содержании тяжелых металлов в картофеле и овощах представлена в табл. 1.

Таблица 1. Статистические характеристики выборки данных о содержании тяжелых металлов в картофеле и овощах, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки, мг/кг сухого вещества

Название элемента	Статистическая характеристика показателя									
	min	max	mid	Sd	Cv, %	Асимметрия	Экссесс	1-й квартиль	med	3-й квартиль
Картофель, n = 150										
Медь	1,49	6,23	3,02	0,93	30,79	0,98	4,48	2,43	2,87	3,44
Цинк	7,18	20,05	10,55	2,59	24,55	1,23	4,96	8,54	9,83	12,29
Марганец	3,54	10,77	6,12	1,51	24,67	1,14	4,34	5,21	5,72	6,71
Свинец	0,01	1,76	0,33	0,39	118,18	1,56	5,54	0,02	0,21	0,55
Кадмий	0,001	0,85	0,11	0,17	154,55	2,66	10,19	0,03	0,04	0,08
Свекла столовая, n = 129										
Медь	3,02	11,29	5,96	1,86	31,21	0,59	3,22	4,78	5,90	7,11
Цинк	15,98	65,24	30,74	9,94	32,34	1,35	5,51	23,82	29,42	35,12
Марганец	7,32	65,73	22,68	11,29	49,78	1,47	6,02	13,76	18,76	28,47
Свинец	0,01	0,73	0,08	0,13	162,50	3,52	17,54	0,02	0,03	0,08
Кадмий	0,001	0,24	0,08	0,05	62,50	0,74	3,66	0,04	0,07	0,11
Морковь столовая, n = 123										
Медь	0,99	8,23	4,44	1,69	38,06	0,65	2,82	3,42	3,92	5,37
Цинк	9,55	45,62	19,65	7,77	39,54	1,33	4,87	14,15	18,46	23,0
Марганец	7,20	80,40	14,14	11,64	82,32	4,73	27,04	9,47	11,39	13,79
Свинец	0,001	2,60	0,54	0,57	105,56	1,49	5,55	0,06	0,35	0,77
Кадмий	0,31	40,13	8,85	8,99	101,58	1,76	5,95	2,38	4,48	12,16
Капуста белокочанная, n = 60										
Медь	1,22	4,52	2,16	0,90	41,67	1,19	3,67	1,54	1,82	2,67
Цинк	9,36	29,20	18,44	5,65	30,64	0,26	2,25	14,83	17,69	22,48
Марганец	7,65	21,75	13,28	3,89	29,29	0,40	2,40	10,55	12,36	16,69
Свинец	0,11	9,02	0,96	1,98	206,25	3,60	15,17	0,13	0,32	0,98
Кадмий	0,011	0,089	0,025	0,021	84,00	1,62	5,19	0,012	0,013	0,039
Лук репчатый, n = 129										
Медь	1,03	6,35	2,75	1,23	44,73	1,24	3,84	1,89	2,36	3,09
Цинк	8,57	44,54	16,47	7,88	47,84	2,06	7,50	11,43	14,56	17,66
Марганец	5,80	17,91	9,55	3,44	36,02	1,10	3,02	7,13	8,06	12,15
Свинец	0,11	1,48	0,23	0,26	113,04	3,16	13,69	0,12	0,13	0,17
Кадмий	0,01	0,11	0,026	0,017	65,38	2,82	13,79	0,015	0,022	0,030

Примечание. Min – минимальное значение; max – максимальное значение; mid – среднее значение; Sd – среднеквадратическое отклонение; Cv – коэффициент вариации; med – медианное значение.

Для оценки степени опасности элемента-загрязнителя использовали коэффициент опасности элемента ($K_{оп}$) – соотношение между концентрацией поллютанта в биомассе растения и его предельно допустимой концентрацией:

$$K_{оп} = C_i / ПДК_i, \quad (1)$$

где C_i – концентрация i -го загрязняющего вещества в биомассе растения, мг/кг;

ПДК $_i$ – предельно допустимая концентрация i -го загрязняющего вещества, мг/кг.

Для количественной оценки поступления тяжелых металлов из почвы в растения использовался коэффициент биологического накопления элемента ($K_{бн}$):

$$K_{бн} = C_p / C_n, \quad (2)$$

где C_p – концентрация загрязняющего вещества в биомассе растения, мг/кг;

C_n – концентрация загрязняющего вещества в почве, мг/кг.

Анализ пространственного распределения загрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами выполнялся с помощью функциональных возможностей модуля «Геопространственный анализ» программного продукта ArcGIS версии 10.5.

Для обучения нейронной сети и создания сложных нелинейных зависимостей использовались функциональные возможности прикладного программного продукта Statistica версии 12.0 [9].

Загрязнение картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных тер-

риторий г. Горки, имеет полиэлементный характер и обусловлено как условиями места произрастания растений и уровнем загрязнения почвы, так и их биологическими особенностями. По содержанию в товарной продукции картофеля и овощей преобладающие позиции занимают цинк, марганец и медь, относящиеся к важным микроэлементам, необходимым для нормального роста и развития растений. Исключение составляет морковь столовая, относящаяся к семейству *Compositae*; она накапливает кадмий в больших количествах, чем необходимые микроэлементы (табл. 1). На способность моркови накапливать значительные количества кадмия в корнеплодах даже на незагрязненной почве указывается и в исследованиях словацких ученых [10]. Установлена средняя положительная корреляционная связь между содержанием в почве подвижного фосфора и калия и содержанием кадмия в корнеплодах моркови: $r = 0,56$ и $0,69$ соответственно. В то же время в исследованиях польских ученых не было обнаружено тесной корреляции между уровнем содержания кадмия в корнеплодах моркови и содержанием в почве подвижных фосфора и калия [11].

В разрезе отдельных культур концентраторами меди являются картофель и свекла столовая, цинка – капуста белокочанная и лук репчатый, кадмия – морковь столовая, а по способности к биологическому накоплению тяжелые металлы располагаются в следующие ниспадающие ряды (табл. 2).

Таблица 2. Ряды интенсивности накопления тяжелых металлов картофелем и овощами, выращиваемыми в пределах агроселитебных территорий г. Горки

Название культуры	Ряд накопления
Картофель	Cu < Cd < Zn < Pb < Mn
Свекла столовая	Cu < Zn < Cd < Mn < Pb
Морковь столовая	Cd < Zn < Cu < Pb < Mn
Капуста белокочанная	Zn < Cu < Cd < Pb < Mn
Лук репчатый	Zn < Cu < Cd < Pb < Mn

Наличие корреляционной зависимости между содержанием Cu, Zn, Mn и Pb в почве и в товарной продукции картофеля и овощей

свидетельствует о том, что главным источником поступления этих тяжелых металлов в растения является именно почва (табл. 3).

Таблица 3. Величина коэффициента корреляции Спирмена, характеризующая взаимосвязь между содержанием тяжелых металлов в урбаноземах и товарной продукции картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки

Название культуры	Название элемента				
	медь	цинк	марганец	свинец	кадмий
Картофель	0,7202	0,8262	0,7083	0,8048	0,3882
Свекла столовая	0,6270	0,6894	0,5699	0,5792	0,2535
Морковь столовая	0,5740	0,6809	0,6658	0,7535	0,3843
Капуста белокочанная	0,9414	0,9278	0,9376	0,9549	0,9289
Лук репчатый	0,6603	0,7176	0,7065	0,7495	0,1289

В то же время для содержания Cd сила такой зависимости оценена как слабая, что свидетельствует о том, что почва не является основным источником поступления кадмия в растения, как это бывает в случае остальных исследуемых поллютантов, а основным путем его транслокации является сорбция аэрозольных загрязнений листовой поверхностью и их диффузия через устьица. Исключение составила лишь капуста белокочанная, для которой корреляционная связь между содержанием кадмия в почве и надземной части оценена как сильная. Это, по нашему мнению, может быть связано с тем, что капуста белокочанная, как и другие представители семейства *Brassicaceae*, относится к гипераккумуляторам цинка [12]; она токсикотолерантна к данному тяжелому металлу [13] и способна накапливать его в больших количествах по сравнению с другими микроэлементами, на что указывается в исследованиях [14, 15]. Из-за химического сродства Cd и Zn растительный организм не различает эти элементы, вследствие чего интенсивно накапливает кадмий совместно с цинком [16, 17]. Избыток свинца в почве также усиливает поступление в растения ионов Cd^{2+} , на что указывают другие авторы [18, 19].

Важно отметить, что поступление тяжелых металлов в почву в пределах территории интереса может быть обусловлено как природными, так и антропогенными факторами. Среди природных преобладающим фактором следует считать минералогический состав материнских пород, на которых сформировался

почвенный покров, а среди антропогенных – неконтролируемое и научно не обоснованное применение в частном секторе хозяйствования органических и минеральных удобрений, агромелиорантов, а также химических средств защиты растений. Определенную роль играет также привнесение загрязненных воздушных масс, содержащих элементы-поллютанты в форме аэрозолей, которые впоследствии оседают на поверхность почвы, а загрязнители мигрируют в низлежащие слои почвенного профиля.

Санитарно-гигиеническое качество картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки, является неудовлетворительным, а доминирующими их загрязнителями выступают: для картофеля Cd (медианное значение $K_{оп} = 1,36$); для свеклы столовой и моркови столовой – Zn и Cd (медианное значение $K_{оп} = 2,94$ и $2,22$ и $1,85$ и $4,48$ соответственно); для капусты белокочанной и лука репчатого – Zn (медианное значение $K_{оп} = 1,77$ и $1,46$ соответственно); для свеклы столовой – Cu (медианное значение $K_{оп} = 1,18$) (рис. 2).

С учетом того, что медианное значение $K_{оп}$ содержания цинка в картофеле составляет $0,98$, колеблясь от $0,72$ до $2,0$, медианное значение $K_{оп}$ содержания меди в моркови столовой составляет $0,78$, колеблясь от $0,20$ до $1,65$, а медианное значение $K_{оп}$ содержания кадмия в луке репчатом составляет $0,73$, колеблясь от $0,33$ до $3,64$, данные элементы следует считать возможными потенциальными загрязнителями товарной продукции вышеуказанных сельскохозяйственных культур.

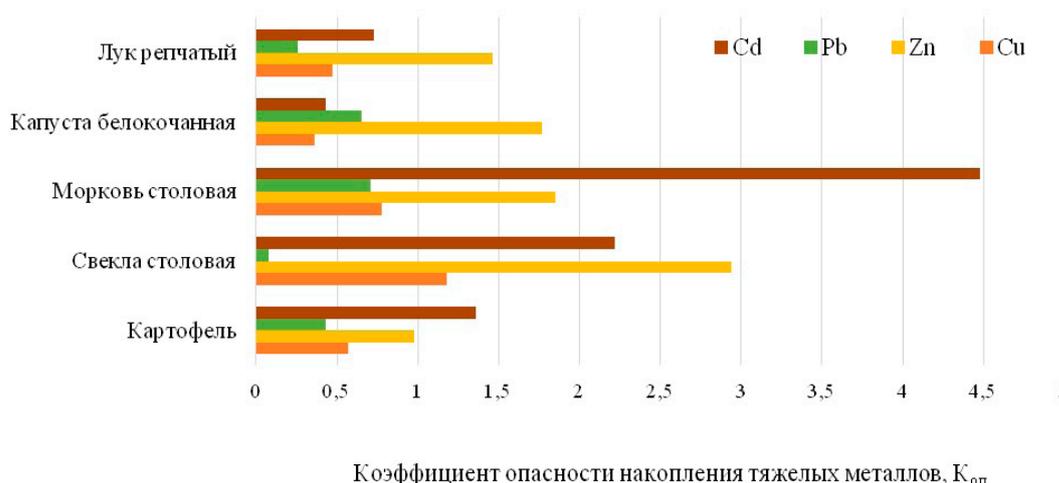


Рис. 2. Медианное значение величины коэффициента опасности накопления тяжелых металлов ($K_{оп}$) в картофеле и овощах, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки

Важно подчеркнуть, что среди исследованной растениеводческой продукции максимальную способность к накоплению поллютантов имеет свекла столовая, которую следует рассматривать в качестве основного источника поступления тяжелых металлов в организм человека. Характерным для всех исследуемых культур оказалось и накопление кадмия, более частое, чем других элементов, что дает основание в случае наличия опасных уровней загрязнения почвы рассматривать данный элемент в качестве потенциального источника поступления тяжелых металлов в организм человека. Также установлена тесная корреляционная зависимость между коэффициентом биологического накопления картофелем и овощами свинца и коэффициентом опасности его содержания в товарной продукции, свидетельствующая о том, что при прочих равных условиях наиболее вероятно загрязнение данным поллютантом свеклы столовой ($R^2 = 0,94$), лука репчатого ($R^2 = 0,85$) и капусты белокочанной ($R^2 = 0,80$).

Чтобы спрогнозировать пространственное загрязнение картофеля и овощей (то есть для построения карт загрязнения по каждой культуре и каждому элементу-загрязнителю) выполнялся поиск наиболее оптимального метода интерполяции.

Для этого вначале исследовалась эффективность следующих детерминированных методов: метод обратных взвешенных расстояний; метод локальных полиномов; метод радиальных базисных функций.

Методы детерминированной интерполяции создают поверхности из измеренных то-

чек, основываясь или на степени схожести (обратные взвешенные расстояния), или на уровне сглаживания (радиальные базисные функции).

Установлено, что наиболее оптимальным является метод радиальных базисных функций, поскольку при выполнении кросс-валидации полученных интерполированных поверхностей именно он обеспечивал наименьшую ошибку.

Для прогнозирования пространственного распределения загрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами, визуализированные результаты которого представлены на рис. 3–5, использован метод радиальных базисных функций (*Radial Basis / Bias Functions, RBF*), относящийся к детерминированным методам интерполяции и представляющий собой жесткий интерполятор, создающий сглаженные поверхности. В отличие от других детерминированных методов интерполяции (в частности, метода обратных взвешенных расстояний, также являющегося жестким интерполятором) радиальные базисные функции позволяют интерполировать значения выше максимального или ниже минимального измеренного значения в выборке геопространственных данных. В качестве радиальных базисных функций чаще всего использовались полностью регуляризованный сплайн и сплайн с натяжением, и лишь в отдельных случаях (прогнозирование пространственного распределения загрязнения цинком моркови столовой и лука репчатого) применялась мультиквадратичная функция (табл. 4).

Далее для каждой культуры и каждого элемента подбирались наиболее оптимальные параметры модели, позволяющие спрогнозировать его пространственное распределение.

Первый параметр – конкретная подобранная функция, наиболее точно описывающая распределение загрязнения (она дает наименьшую ошибку при выполнении кросс-валидации), указанная в табл. 4 как функция ядра. Всего таких функций может быть пять (h – расстояние; δ – сглаживающий параметр, указанный в табл. 4 как параметр ядра):

- тонкий сплайн (TPS): $B(h) = (h^2 + \delta^2) \lg(h^2 + \delta^2)$;
- сплайн с напряжением (SPT): $B(h) = (h^2 + \delta^2)^{1/2}$;
- полностью регуляризованный сплайн (CRS): $B(h) = \lg(h^2 + \delta^2)$;
- мультиквадратичная функция (MQ): $B(h) = \sqrt{h^2 + \delta^2}$;
- обратная мультиквадратичная функция (IMQ): $B(h) = \frac{1}{\sqrt{h^2 + \delta^2}}$.

Поскольку для пространственного загрязнения картофеля и овощей использовались

методы геостатистики, оперирующие геопространственными данными (не путать с традиционной статистикой, которая оперирует случайными величинами), а инструментом для создания прогнозных моделей являлся модуль «Геопространственный анализ» программного продукта ArcGIS версии 10.5, при создании оптимальной модели учитывались и факторы, характеризующие пространственное распределение геоданных, в частности тип сектора (может быть 1 без смещения, 4 без смещения, 8 без смещения, 4 со смещением 45 градусов и 8 со смещением 45 градусов) и радиус полуоси выбранного сектора. Под сектором подразумевается окружность (или эллипс, если речь идет о секторе со смещением), в пределах которой значения измеренных точек используются для прогнозирования значения в точке, где измерения не проводились (показана желтым цветом).

Таблица 4. **Параметры моделей пространственного распределения загрязнения картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки (метод интерполяции – радиальные базисные функции)**

Название культуры	Тяжелый металл	Функция ядра ¹	Параметр ядра ²	Тип сектора ³	Радиус полуоси ⁴ , м
Картофель	Cu	Полностью регуляризованный сплайн	0,0697	1 без смещения	1888,231
	Zn				
	Pb	Сплайн с натяжением	0,1004		
	Cd				
Морковь столовая	Cu	Полностью регуляризованный сплайн	0,0592	1 без смещения	1865,778
	Zn	Мультиквадратичная	0		
	Pb	Полностью регуляризованный сплайн	0,0135		
	Cd	Сплайн с натяжением	0,0129		
Свекла столовая	Cu	Полностью регуляризованный сплайн	0,0592	4 без смещения	1888,231
	Zn	Сплайн с натяжением	0,0853		
	Pb	Сплайн с натяжением	0,0853	1 без смещения	
	Cd				
Капуста белокочанная	Cu	Сплайн с натяжением	0,0083	4 без смещения	1392,306
	Zn		0,0738		
	Pb	Полностью регуляризованный сплайн	0,0181	1 без смещения	
	Cd		0,0513	4 без смещения	
Лук репчатый	Cu	Полностью регуляризованный сплайн	0,0614	1 без смещения	1888,231
	Zn	Мультиквадратичная	0		
	Pb	Сплайн с натяжением	0,1004		
	Cd				

П р и м е ч а н и е. ¹ – функция, наиболее точно описывающая характер распределения загрязнения; ² – сглаживающий параметр; ³ – окружность, в пределах которой значения измеренных точек используются для прогнозирования значения в точке, где измерения не проводились; ⁴ – радиус окружности.

По результатам выполненных исследований определены три зоны с различным уровнем комплексного загрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами. Суммарная площадь зон, в пределах которых возможно получение незагрязненных клубней картофеля, составляет 1249,58 га, в то время как территория, в пределах которой следует избегать выращивания данной культуры, занимает 435,27 га. Территориально такие зоны размещены в пределах микрорайона Заречье, левого берега р. Поросицы (район ул. В. Чапаева, О. Кошевого, Озерной, М. Горецкого, К. Циолковского, С. Королева), части садового товарищества «Садовод», района ул. Соловьинной, Гаражной и Дворцовой, в районе ул. Высокой (рис. 3 а).

Площадь зон, в пределах которых возможно получение относительно не загрязненных тяжелыми металлами корнеплодов свеклы, составляет 182,69 га, а территория, в пределах которой следует избегать выращивания данной культуры, – 661,09 га. Территориально

зоны с максимальным загрязнением товарной продукции столовой свеклы размещены в пределах северной и восточной части города, микрорайона Заречье, левого берега р. Поросицы (район улиц О. Кошевого, Озерной, М. Горецкого), части улиц Якубовского, Бруцера-Ерофеевской и Красинской (рис. 3 б).

Суммарная площадь зон, в пределах которых возможно получение относительно незагрязненных корнеплодов моркови, составляет 904,77 га, в то время как площадь территории, в пределах которой следует избегать выращивания столовой моркови, – 159,84 га. Территориально зоны, в пределах которых возможно получение относительно экологически безопасной товарной продукции моркови, размещены в пределах садовых товариществ «Садовод» и «Труд», в районе дендропарка, центральной части города и микрорайона Заречье, а зоны, в пределах которых следует избегать выращивания моркови, – в микрорайоне Слобода и в районе гаражного кооператива «Белый ручей» (рис. 4 а).

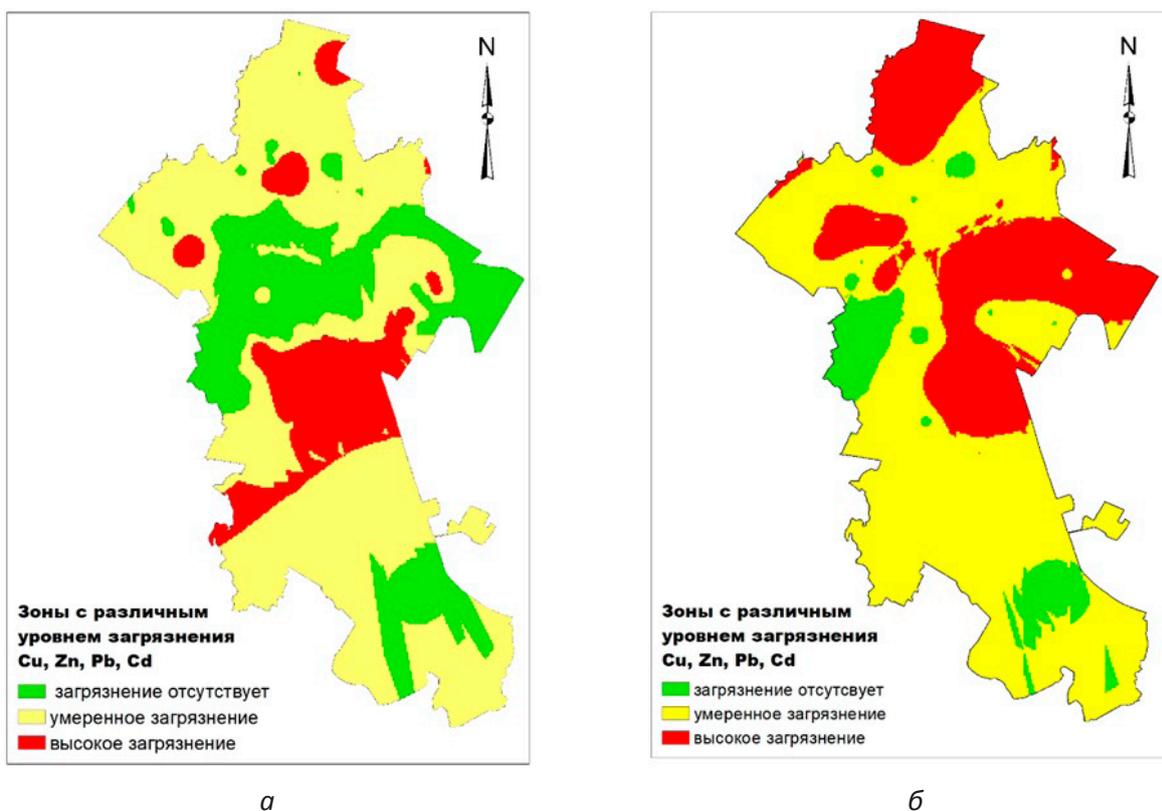


Рис. 3. Зоны с комплексным загрязнением тяжелыми металлами картофеля (а) и корнеплодов столовой свеклы (б), выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки

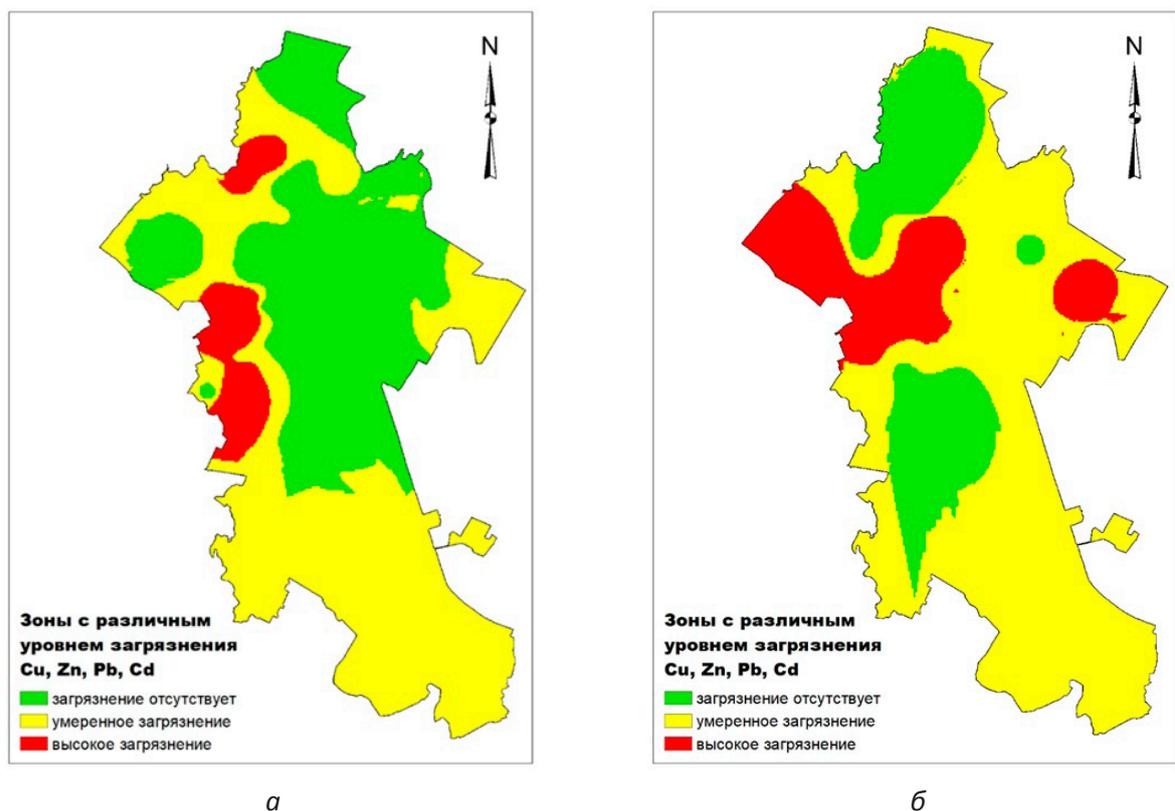


Рис. 4. Зоны с комплексным загрязнением тяжелыми металлами моркови столовой (а) и капусты белокочанной (б), выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки

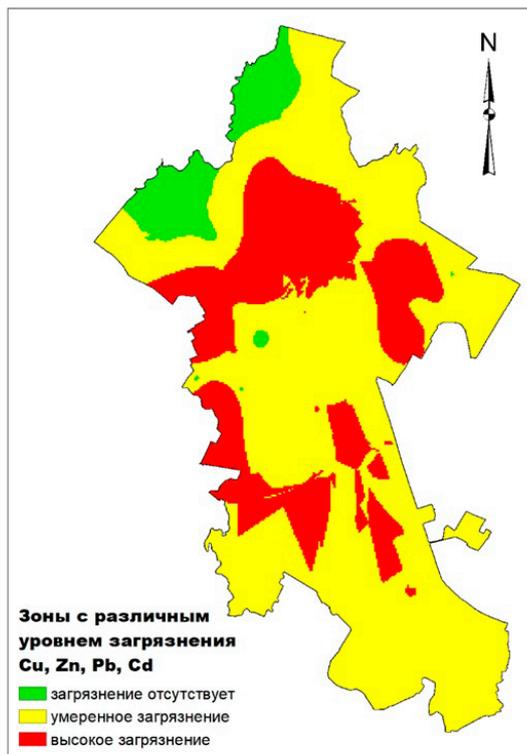


Рис. 5. Зоны с комплексным загрязнением тяжелыми металлами лука репчатого, выращиваемого в пределах агроселитебных территорий г. Горки

Суммарная площадь зон, в пределах которых возможно получение относительно незагрязненных кочанов капусты, составляет 494,92 га, а площадь территории, в пределах которой следует избегать выращивания капусты белокочанной, занимает 349,40 га. Территориально зоны, в пределах которых возможно получение относительно незагрязненных кочанов капусты, размещены в пределах садового товарищества «Садовод» и микрорайона Заречье, а зоны, в пределах которых следует избегать выращивания капусты белокочанной, – в районе ул. Машерова, на территории садового товарищества «Труд» и в пределах левого берега р. Поросицы (район ул. О. Кошевого, Озерной, М. Горецкого) (рис. 4 б).

Суммарная площадь зон, в пределах которых возможно получение относительно незагрязненной товарной продукции, составляет 157,42 га, в то время как площадь территории, в пределах которой следует избегать выращивания лука репчатого, – 584,54 га. Территориально зоны, в пределах которых возможно получение относительно незагрязненного лука репчатого, размещены в пределах садового товарищества «Садовод», северной части садового товарищества «Труд» и в районе гаражного кооператива «Белый ручей», а зоны, в пределах которых следует избегать выращивания лука, – в районе ул. Якубовского, Бруцера-Ерофеевской, Фурманова, Матросова, Космонавтов, в северной и южной части микрорайона Слобода и в районе ул. Первомайской и железнодорожной станции Погодино (рис. 5).

Для создания моделей, позволяющих прогнозировать накопление тяжелых металлов в картофеле и овощах, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки, использованы автоматизированные нейронные сети из многослойных перцептронов с минимальным и максимальным количеством скрытых нейронов 3 и 10 соответственно (табл. 5).

По результатам тестирования обученных нейронных сетей установлено, что в отношении картофеля они с наибольшей эффек-

тивностью способны спрогнозировать накопление им Zn и Mn (MAPE = 2,54 % и 0,51 % соответственно). Нейронную сеть для прогноза накопления кадмия в клубнях картофеля не удалось обучить даже при использовании в качестве независимых переменных содержания данного элемента в почве и коэффициента его биологического накопления. Поэтому можно с определенной долей вероятности констатировать, что на поступление кадмия в растения картофеля более интенсивно влияет его поглощение из аэральных загрязнений, нежели из почвы. Для свеклы столовой обученная нейронная сеть с наибольшей эффективностью способна спрогнозировать накопление Cu и Mn (MAPE = 2,76 % и 1,26 % соответственно), а для моркови столовой – Cu (MAPE = 1,38 %). Поскольку не удалось обучить нейронную сеть для выполнения достоверного прогноза накопления свинца в корнеплодах свеклы столовой и моркови столовой, можно с определенной долей вероятности предположить, что на накопление данного элемента могут влиять факторы, не учтенные в модели, в частности сортовые особенности данных овощных культур. Что касается агрохимических свойств почвы в модели нелинейной регрессии, создаваемой для прогнозирования накопления меди и цинка в столовых корнеплодах, был учтен показатель pH, поскольку и Cu, и Zn легкоподвижны в кислых почвах и способны накапливаться в больших количествах в растениях, произрастающих на таких почвах. Нейронные сети, обученные для прогноза загрязнения кочанов капусты белокочанной, оказались наиболее высокоэффективны в сравнении с нейронными сетями, созданными для прогноза загрязнения других культур. Максимальная эффективность созданной прогнозной модели установлена в отношении прогнозирования накопления Cu и Cd (MAPE = 0,15 % и 0,58 % соответственно). Для лука репчатого получены эффективные нейронные сети, способные с высокой вероятностью прогнозировать накопление данной культурой Cu и Mn (MAPE = 0,11 % и 0,19 % соответственно).

Таблица 5. Характеристики нейронных сетей, обученных для выполнения прогноза загрязнения тяжелыми металлами картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки

Элемент, содержание которого прогнозируется	Факторы с максимальным влиянием			Архитектура нейронной сети	Средняя абсолютная ошибка тестовой выборки данных, MAPE, %	Функция активации	
	содержание в почве	коэффициент биологического накопления	агрохимические свойства почвы			скрытого нейрона	исходного нейрона
<i>Картофель, n = 150</i>							
Cu	Cu, Cd	Cu	–	MLP 3–9–1	5,39	экспоненциальная	тождественная
Zn	Zn, Cu	Zn	P ₂ O ₅	MLP 4–8–1	2,54	экспоненциальная	тождественная
Mn	Mn	Mn	K ₂ O	MLP 3–7–1	0,91	тангенциальная	экспоненциальная
Pb	Pb, Cu	Pb	–	MLP 3–10–1	10,34	тангенциальная	тангенциальная
<i>Свекла столовая, n = 129</i>							
Cu	Cu	Cu	P ₂ O ₅	MLP 3–9–1	2,76	экспоненциальная	логистическая
Zn	Zn	Zn	pH	MLP 3–7–1	4,46	логистическая	тангенциальная
Mn	Mn, Zn	Mn	K ₂ O	MLP 4–6–1	1,26	экспоненциальная	тождественная
Cd	Cd	Cd	–	MLP 2–8–1	9,49	экспоненциальная	тангенциальная
<i>Морковь столовая, n = 123</i>							
Cu	Cu	Cu	pH	MLP 3–7–1	1,38	экспоненциальная	тождественная
Zn	Zn, Mn	Zn	–	MLP 3–9–1	9,38	логистическая	тождественная
Mn	Mn	Mn	P ₂ O ₅	MLP 3–4–1	7,98	тангенциальная	тождественная
Cd	Cd	Cd	P ₂ O ₅	MLP 3–9–1	6,60	экспоненциальная	тождественная
<i>Капуста белокочанная, n = 60</i>							
Cu	Cu, Zn, Pb	Cu	–	MLP 4–10–1	0,15	экспоненциальная	тождественная
Zn	Zn, Cu	Zn	pH	MLP 4–4–1	5,18	логистическая	тождественная
Mn	Mn, Cd	Mn	–	MLP 3–8–1	1,43	экспоненциальная	тождественная
Pb	Pb, Mn	Pb	–	MLP 3–10–1	3,81	тангенциальная	экспоненциальная
Cd	Cd	Cd	–	MLP 2–9–1	0,58	тангенциальная	тождественная
<i>Лук репчатый, n = 129</i>							
Cu	Cu, Mn	Cu	–	MLP 3–7–1	0,11	экспоненциальная	тождественная
Zn	Zn, Pb	Zn	–	MLP 3–3–1	9,45	экспоненциальная	тождественная
Mn	Mn	Mn	P ₂ O ₅	MLP 3–4–1	0,19	тангенциальная	тождественная
Pb	Pb, Zn	Pb	–	MLP 3–3–1	1,81	экспоненциальная	тангенциальная
Cd	Cd	Cd	K ₂ O	MLP 3–4–1	8,38	тангенциальная	тождественная

П р и м е ч а н и е. 1) объем обучающей выборки – 70 % от общего объема выборки данных; 2) объем обучающей выборки – 15 % от общего объема выборки данных; 3) обучение сети выполнялось с помощью алгоритма Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно (BFGS), итерационного метода численной оптимизации, предназначенного для нахождения локального максимума/минимума нелинейного функционала без ограничений.

Заключение

Полученные результаты дают основания для следующих выводов.

1. В пределах агроселитебных территорий г. Горки наиболее загрязнены тяжелыми металлами корнеплоды свеклы столовой,

а в качестве потенциально опасных по уровню загрязнения получаемой товарной продукции картофеля и овощей определены территория в районе ул. Соловьинной, Дружной, Северной, Гаражной, В. Чапаева, О. Кошевого, К. Циол-

ковского, Озерной, М. Горецкого, П. Машерова, Железнодорожной, части садоводческого товарищества «Садовод», находящейся в районе полигона БГСХА, западной и южной окраины садоводческого товарищества «Труд», северной части микрорайона Слобода и восточной части микрорайона Заречье.

2. Для моделирования пространственного распределения загрязнения тяжелыми металлами картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных территорий г. Горки, целесообразно использовать детерминированный метод интерполирования с применением таких радиальных базисных функций, как полностью регуляризованный сплайн и сплайн с натяжением, а в отдельных случаях – мультиквадратичной функции.

3. Использование нейронных сетей эффективно для создания моделей прогноза накопления тяжелых металлов в картофеле и овощах в зависимости от содержания поллютантов в почве, биологических особенностей сель-

скохозяйственных культур и агрохимических свойств почвы, однако создание адекватных прогнозных моделей накопления в растениях Pb и Cd в условиях реальных агроселитебных территорий не всегда возможно, так как довольно трудно спрогнозировать уровень их антропогенного привнесения.

4. Необходимо принятие соответствующих управленческих решений, в первую очередь информирование жителей г. Горки об опасности выращивания картофеля и овощей в пределах зон, определенных в качестве потенциально опасных по получению загрязненной товарной продукции, а также обеспечение мониторинга качества растениеводческой продукции, выращиваемой населением в пределах агроселитебных территорий г. Горки.

Дальнейшие исследования следует сосредоточить в направлении определения канцерогенного и неканцерогенного рисков для здоровья населения от употребления в пищу картофеля и овощей.

Библиографический список

1. Мыслыва, Т. Н. Тяжелые металлы в агроселитебных ландшафтах г. Горки / Т. Н. Мыслыва, О. Н. Левшук // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2019. – № 2. – С. 211–216.
2. Социальное положение и уровень жизни населения Республики Беларусь : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь; Гос. ком. по имуществу Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – 264 с.
3. Сельское хозяйство Республики Беларусь : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – 179 с.
4. Мыслыва, Т. Н. Загрязнение тяжелыми металлами овощных культур, выращиваемых в пределах 15-км пригородной зоны г. Житомир / Т. Н. Мыслыва // Молодежь и инновации – 2013: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Горки, 29–31 мая 2013 г. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2013. – С. 201–204.
5. Öztürk, E. Variation in heavy metal concentrations of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars / E. Öztürk, E. Atsan, T. Polat, K. Kara // Journ. of Animal and Plant Sciences. – 2011. – Vol. 21 (2). – P. 235–239.
6. Водяницкий, Ю. Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) / Ю. Н. Водяницкий // Почвоведение. – 2013. – № 7. – С. 872–881.
7. Станченко, Л. Ю. Распределение тяжелых металлов в почвах и растительности городских экосистем Калининградской области / Л. Ю. Станченко // Вестн. Рос. гос. ун-та имени И. Канта. – 2009. – № 1. – С. 81–85.
8. Дабахов, М. В. Тяжелые металлы: экотоксикология и проблемы нормирования : монография / М. В. Дабахов, Е. В. Дабахова, В. И. Титова. – Н. Новгород : Изд-во ВВАГС, 2005. – 165 с.
9. Боровиков, В. П. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов / В. П. Боровиков. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2003. – 688 с.
10. Kugonic, N. The accumulation of cadmium, lead and zinc by different vegetables from Zasavje (Slovenia) / N. Kugonic, H. Grcman // Plant Physiology. – 1999. – Vol. 39. – P. 161–165.

11. Sady, W. The effect of physical and chemical soil properties on the accumulation of cadmium in carrot / W. Sady, S. Rozek // *Acta Horticulturae*. – 2002. – Vol. 571. – P. 73–77. <https://doi/10.17660/ActaHortic.2002.571.7>.
12. Balafrej, H. Zinc hyperaccumulation in plants: a review / H. Balafrej, D. Bogusz, Z.-E. A. Triqui, A. Guedira, N. Bendaou, A. Smouni, M. Fahr // *Plants (Basel)*. – 2020. – Vol. 9 (5). – P. 562. <https://doi.org/10.3390/plants9050562>.
13. Kusznerewicz, B. The dose-dependent influence of zinc and cadmium contamination of soil on their uptake and glucosinolate content in white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *alba*) / B. Kusznerewicz, R. Bączek-Kwinta, A. Bartoszek, A. Piekarska, A. Huk, A. Manikowska, J. Antonkiewicz, J. Namieśnik, P. Konieczka // *Environmental Toxicology and Chemistry*. – 2012. – Vol. 31 (11). – P. 2482–2489. Doi: 10.1002/etc.1977.
14. Boamponsem, G. A. Heavy metals accumulation in cabbage, lettuce and carrot irrigated with wastewater from Nagodi mining site in Ghana / G. A. Boamponsem, M. Kumi, I. Debrah // *International Journ. of Scientific and Technology Research*. – 2012. – Vol. 1, iss. 11. – P. 124–129.
15. Rajan, Sh. Accumulation and health risk of heavy metals in cabbage due to long-term mineral fertilization from vegetable production systems in Kundasang, Sabah / Sh. Rajan, Kh. E. Wakimin, N. S. M. Shahid, A. Azmi // *Malaysian Journ. of Medicine and Health Sciences*. – 2021. – Vol. 17. – P. 105–110.
16. Мислива, Т. М. Важкі метали в урбаноземах агроселітебних ландшафтів південно-західної частини м. Житомира / Т. М. Мислива, Л. О. Герасимчук // *Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Сер. Агрономія*. – 2011. – Вип. 162. – Ч. 1. – С. 155–165.
17. Renildes, L. F. Fontes Uptake and translocation of Cd and Zn in two lettuce cultivars / L. F. Renildes, R. L. F. Fontes, J. M. N. Pereira, J. C. L. Neves // *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. – 2014. – Vol. 86 (2). – P. 907–922. Doi: 10.1590/0001-37652014117912.
18. Ильин, В. Б. Содержание тяжелых металлов в почвах и растения Новосибирска / В. Б. Ильин, Н. Л. Байдина, Г. А. Конарбаева, Г. А. Черевко // *Агрохимия*. – 2000. – № 1. – С. 66–73.
19. Agbenin, J. O. Competitive adsorption of copper and zinc by a Bt horizon of a savanna Alfisol as affected by pH and selective removal of hydrous oxides and organic matter / J. O. Agbenin, L. A. Olojo // *Geoderma*. – 2004. – Vol. 119. – P. 85–95. Doi: 10.1016/S0016-7061(03)00242-8.

Поступила 27 июля 2021 г.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЛЕТУЧИХ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

*Д. В. Мелех, заместитель заведующего отделом
международного научного сотрудничества*

*Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие «Бел НИЦ "Экология"»,
г. Минск, Беларусь*

Аннотация

При добыче нефти и природного газа, а также при обращении с ними происходят летучие выбросы парниковых газов, которые должны оцениваться Республикой Беларусь в соответствии с международными обязательствами по Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. В статье впервые подробно описывается категория «летучие выбросы» в секторе «Энергетика» страны, представлена разработанная автором модель оценки летучих выбросов парниковых газов от добычи нефти и природного газа и обращения с ними.

Ключевые слова: летучие выбросы, парниковые газы, нефть, природный газ, метан.

Abstract

D. V. Melekh

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR ASSESSING FUGITIVE EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Fugitive emissions of greenhouse gases occur during the production of oil and natural gas, as well as during their handling, which must be assessed by the Republic of Belarus in accordance with international obligations under the United Nations Framework Convention on Climate Change. For the first time, the paper describes in detail the Fugitive Emissions category of the country's Energy Sector and develops a model for estimating fugitive greenhouse gas emissions from oil and natural gas production and handling.

Keywords: fugitive emissions, greenhouse gases, oil, natural gas, methane.

Введение

Выбросы парниковых газов (далее – ПГ) от добычи, преобразования и транспортировки первичных энергоносителей называются летучими выбросами и относятся к сектору «Энергетика», составляя порядка 2 % выбросов ПГ по данному сектору в Республике Беларусь. Примерами являются утечки природного газа и выбросы метана при добыче угля, сжигании в факелах в процессе добычи и переработки нефти и газа [1].

Методологии для расчета летучих выбросов в секторе «Энергетика» значительно отличаются от тех, которые используются для сжигания ископаемого топлива. Летучие выбросы имеют

тенденцию к диффузии и с трудом поддаются прямому мониторингу. Кроме того, эти методы довольно специфичны в отношении типа высвобождения выбросов. Например, методы для добычи угля связаны с геологическими особенностями угольных пластов, тогда как методы для летучих протечек нефтегазовых производств связаны с обычными видами оборудования [1]. В данной статье впервые подробно описана категория «летучие выбросы» сектора «Энергетика» Беларуси, представляется разработанная автором модель количественной оценки летучих выбросов ПГ от добычи нефти и природного газа и обращения с ними

Основная часть

Добыча угля в Беларуси не ведется, поэтому летучие выбросы происходят только от систем снабжения нефтью и природным газом и учитываются в подкатегории 1.B.2 сектора «Энергетика» ежегодной инвентаризации выбросов и поглощений ПГ, которая состоит из таблиц CRF (*Common Reporting Format* – Общий формат данных) и национального отчета об инвентаризации, направляющихся в секрета-

риат Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН) и проверяющихся группой международных экспертов под руководством Секретариата РКИК ООН. Детальная разбивка категории «летучие выбросы» сектора «Энергетика» в Беларуси, согласно структуре отчетности РКИК ООН для ежегодных инвентаризаций выбросов и поглощений ПГ, представлена в табл. 1.

Таблица 1. Детальная разбивка категории «летучие выбросы» сектора «Энергетика» в Беларуси

Наименование подкатегории	Статус подкатегории согласно национальным обстоятельствам
1.В.1 Твердое топливо	–
1.В.1.а Добыча и обработка угля	–
1.В.1.а.1 Подземные шахты	–
1.В.1.а.1.i Горные разработки	NO ¹
1.В.1.а.1.ii Выбросы газов в пластах после добычи	NO ¹
1.В.1.а.1.iii Закрытые подземные шахты	NO ¹
1.В.1.а.2 Карьерные разработки	–
1.В.1.а.2.i Горные разработки	NO ¹
1.В.1.а.2.ii Выбросы газов в пластах после добычи	NO ¹
1.В.1.б Переработка твердого топлива	NO ¹
1.В.1.с Проч. (просьба указать)	NO ¹
1.В.2 Нефть и природный газ и другие выбросы от производства энергии	–
1.В.2.а Нефть	–
1.В.2.а.1 Разведка	NO ¹
1.В.2.а.2 Добыча	Выбросы ПГ
1.В.2.а.3 Транспорт	Выбросы ПГ ²
1.В.2.а.4 Очистка/хранение	Выбросы ПГ ²
1.В.2.а.5 Распределение нефтепродуктов	IE (1.В.2.а.4)
1.В.2.а.6 Проч.	Выбросы ПГ ²
1.В.2.б Природный газ	–
1.В.2.б.1 Разведка	NO ¹
1.В.2.б.2 Добыча	Выбросы ПГ ²
1.В.2.б.3 Переработка	IE ³ (1.В.2.б.2)
1.В.2.б.4 Транспортировка и хранение	Выбросы ПГ ²
1.В.2.б.5 Распределение	Выбросы ПГ ²
1.В.2.б.6 Проч.	Выбросы ПГ ²
1.В.2.с Отвод газов и сжигание в факелах	–
1.В.2.с.1 Отвод газов	–
1.В.2.с.1.i Нефть	IE ³ (1.В.2.с.2.iii)
1.В.2.с.1.ii Газ	IE ³ (1.В.2.с.2.iii)
1.В.2.с.1.iii В совокупности	IE ³ (1.В.2.с.2.iii)
1.В.2.с.2 Сжигание в факелах	–
1.В.2.с.2.i Нефть	IE ³ (1.В.2.с.2.iii)
1.В.2.с.2.ii Газ	IE ³ (1.В.2.с.2.iii)
1.В.2.с.2.iii В совокупности	выбросы ПГ ²
1.В.2.д Проч. (просьба указать)	–
Транспорт природного газа	выбросы ПГ ²

Примечание. NO¹ (*not occurring* – не происходит) применяется для категорий или процессов, не происходящих в Беларуси; выбросы ПГ² – это происходящие в Беларуси процессы, относящиеся к данной подкатегории; соответствующие выбросы ПГ оценены и отображены в данной подкатегории; IE³ (*Included elsewhere* – включено в другом месте) применяется для выбросов оцененных ПГ, но включенных в другой раздел инвентаризации, но не в ожидаемую категорию источников. После условного обозначения «IE» в скобках указана подкатегория, в которую в период инвентаризации включены выбросы, что связано со структурой исходных данных, применяемых для расчетов.

Термин «летучие выбросы» подразумевает все ПГ, высвобождающиеся из систем распределения нефти и газа, за исключением выбросов от сжигания топлива при производстве полезного тепла или энергии на стационарных или мобильных источниках. Системы распределения нефти и газа включают в себя всю инфраструктуру, необходимую для производства, сбора, обработки или очистки и доставки природного газа и нефтепродуктов на рынок. Системы начинаются с устья скважины нефтяного либо газового источника и заканчиваются финальной торговой точкой продажи потребителю [2].

Источники летучих выбросов от газовых и нефтяных систем включают (но не ограничиваются ими) протечки оборудования, потери от испарения, удаление газов, сжигание в факелах и случайные выбросы (например, повреждение труб при земляных работах, выбросы из скважин и проливы). Некоторые из этих источников выбросов умышленны и/или преднамеренны (удаление газов и сжигание в факелах), поэтому для них сравнительно хорошо описаны состав выбросов и количество, которые сопряжены с существенной неопределенностью [2].

Летучие выбросы являются прямыми источниками следующих ПГ:

- CH_4 в результате испарения (высвобождения);
- CO_2 , содержащийся в добываемых нефти и газе при извлечении из пласта;
- N_2O , CO_2 от технологического сжигания (сжигание попутного газа в факелах) [2].

Как правило, точная количественная оценка летучих выбросов из систем нефти и природного газа затруднительна при подготовке в большинстве стран инвентаризаций выбросов и поглощений ПГ. Это в значительной степени объясняется разнообразием данной промышленности, большим количеством потенциальных источников выбросов, разными уровнями контроля над выбросами и ограниченностью имеющихся данных об источниках выбросов.

Основные проблемы при оценке выбросов заключаются в следующем:

- использование простых, основанных на производстве коэффициентов выбросов ведет к возникновению значительных неопределенностей;
- необходимость подробных данных, получение которых может быть трудным и дорогостоящим;
- выполнение измерений требует много времени и больших денежных затрат.

Существуют три методологических уровня для определения летучих выбросов из нефтегазовых систем. Для эффективной количественной оценки необходимо разделять деятельность на основные категории и подкатегории в нефтяной и газовой промышленности (табл. 1), а затем оценивать выбросы отдельно для каждой из них. Методологический уровень, применяемый к каждому сегменту, должен соответствовать количеству выбросов и доступным ресурсам. Следовательно, можно применять различные методологические уровни для различных категорий и подкатегорий и использовать фактические данные измерений выбросов или результаты мониторинга для некоторых более крупных источников [2].

Уровень 1 включает в себя коэффициенты выбросов по умолчанию и соответствующие исходные данные о деятельности (обычно о производительности) для каждой подкатегории нефтяной и газовой промышленности страны; он должен применяться только для неключевых категорий. Использование подхода уровня 1 выполняется с помощью уравнений 1 и 2:

Уравнение 1. Оценка летучих выбросов из сегмента отрасли:

$$E_{\text{газ, сегмент отрасли}} = A_{\text{сегмент отрасли}} \cdot EF_{\text{газ, сегмент отрасли}}$$

Уравнение 2. Суммарная оценка летучих выбросов из сегментов отрасли:

$$E_{\text{газ}} = \sum_{\text{сегмент отрасли}} E_{\text{газ, сегмент отрасли}},$$

где $E_{\text{газ, сегмент отрасли}}$ – годовые выбросы (тыс. тонн);

$A_{\text{сегмент отрасли}}$ – значение деятельности (единиц деятельности);

$EF_{\text{газ, сегмент отрасли}}$ – коэффициент выбросов (тыс. тонн / ед. деятельности).

Уровень 2 заключается в использовании уравнений уровня 1 (уравнения 1 и 2) с национальными коэффициентами вместо коэффициентов выбросов по умолчанию. Его следует применять к ключевым категориям там, где использование подхода уровня 3 неосуществимо. Национальные коэффициенты могут быть разработаны в результате исследовательских и измерительных программ или быть получены изначально с применением подхода уровня 3, а затем обратного расчета коэффициентов выбросов уровня 2 с использованием уравнений 1 и 2.

Уровень 3 основан на инструментальных измерениях; он включает применение строгой восходящей оценки по основному типу источника (например, отвод, сжигание в факелах, летучие протечки оборудования, потери при испарении и аварийные утечки) на уровне отдельного объекта. Его следует использовать для ключевых категорий, когда доступны необходимые данные о деятельности и инфраструктуре.

Укажем основные типы данных, которые используются для оценки уровня 3:

- учет количества единиц оборудования или технологических установок на каждом объекте по их видам;
- перечень скважин и мелких установок (например, осушители, аппаратура для замеров и т. д.);
- национальные результаты анализов сжигания в факелах, отвода и переработки для каждой подкатегории;
- анализ и место образования высокосернистых газов в разрезе оборудования;
- зарегистрированные выбросы в атмосферу вследствие повреждения трубопроводов;
- национальные коэффициенты выбросов.

Таблица 2. Структура модели расчета летучих выбросов ПГ от добычи нефти и природного газа и обращения с ними, включающая коэффициенты, источники исходных данных и измерений (расчетов) на уровне объекта

Категория	Наименование категории	Исходные данные		CH ₄			CO ₂			N ₂ O			ед. изм.	Источник коэфф	Измерение (расчет) на уровне объекта
		наименование	источник	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.			
1.В.2.а Нефть															
1.В.2.а.2	добыча	кол-во добытой нефти, тыс. т		1,5·10 ⁻⁶	6,0·10 ⁻²	3,0·10 ⁻²	1,1·10 ⁻⁷	4,3·10 ⁻³	2,15·10 ⁻³	NA			тыс. т/10 ⁶ м ³	МГЭИК 2006 [2]	–
1.В.2.а.3	транспорт	кол-во транспортировки нефти, тыс. т	Белорус.гос. концерн по нефти и химии		5,4·10 ⁻⁶			4,9·10 ⁻⁷		NA			тыс. т/10 ⁶ м ³	МГЭИК 2006 [2]	–
1.В.2.а.4	очистка/хранение	кол-во переработки нефти, тыс. т		90	1400	745		–		–			кг/ПДж	МГЭИК 1996 [3]	–
1.В.2.а.6	проч.	кол-во хранения нефти, тыс. т		20	250	135		–		–			кг/ПДж	МГЭИК 1996 [3]	–
1.В.2.б Природный газ															
1.В.2.б.2	добыча	кол-во добытого газа, млн. м ³	Белорус.гос. концерн по нефти и химии	3,8·10 ⁻⁴	2,4·10 ⁻²	1,2·10 ⁻²	1,4·10 ⁻⁵	1,8·10 ⁻⁴	9,7·10 ⁻⁵	NA			тыс. т/10 ⁶ м ³	МГЭИК 2006 [2]	–
1.В.2.б.4	транспорт	хранение	Энергетический баланс Республики Беларусь	16,6·10 ⁻⁵	1,1·10 ⁻³	63,3·10 ⁻³	8,8·10 ⁻⁷	2,0·10 ⁻⁶	14,4·10 ⁻⁷	NA			тыс. т/10 ⁶ м ³	МГЭИК 2006 [2]	–
				2,5·10 ⁻⁵	5,8·10 ⁻⁵	41,5·10 ⁻⁶	1,1·10 ⁻⁷	2,6·10 ⁻⁷	18,5·10 ⁻⁸		тыс. т/10 ⁶ м ³	МГЭИК 2006 [2]	–		
1.В.2.б.5	распределение	сумма добытого и импорт. газа, млн м ³		1,1·10 ⁻³	2,5·10 ⁻³	1,8·10 ⁻³	5,1·10 ⁻⁵	1,4·10 ⁻⁴	95,5·10 ⁻⁶	ND			тыс. т/10 ⁶ м ³	МГЭИК 2006 [2]	–
1.В.2.б.6	проч.				–			–		–			–	–	CH ₄ , ГПО «Белтопгаз»
1.В.2.с Отвод газов и сжигание в факелах															
1.В.2.с.iii	в совокупности	количеств. информация об отводе газа и факельном сжигании в результате добычи нефти и газа, млн м ³	Белорус.гос. концерн по нефти и химии	2,5·10 ⁻⁵	3,4·10 ⁻⁵	3,0·10 ⁻⁵	4,1·10 ⁻²	5,6·10 ⁻²	4,9·10 ⁻²	6,4·10 ⁻⁷	8,8·10 ⁻⁷	7,6·10 ⁻⁷	тыс. т/10 ⁶ м ³	МГЭИК 2006 [2]	–
1.В.2.д Проч. (просьба указать) – транспорт природного газа															
1.В.2.д	транспорт природного газа	количеств. информация об объеме транспортируемого природного газа, млн т у. т.	ОАО «Газпром трансгаз Беларусь»	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	CH ₄ , ОАО «Газпром трансгаз Беларусь»

Примечания. NA (Not Applicable) – неприменимо; плотность нефти – 0,872 тонн/м³ [4]; низшая теплотворная способность нефти – 0,0423 ПДж/тыс. тонн [1]; низшая теплотворная способность природного газа – 33,82 ТДж/млн м³ [5]; ND (Not determined) – не определено; коэффициент перевода тыс. т у. т. в ТДж – 29,308 ТДж/тыс. т у. т.

Таблица 3. Расчет летучих выбросов ПГ на основании разработанной модели расчета летучих выбросов ПГ от добычи нефти и природного газа и обращения с ними

Категория	Наименование категории	ПГ (тыс. т)	Год									
			1990	1995	2000	2005	2010	2016	2017	2018	2019	
1.В.2.а Нефть												
1.В.2.а.2	добыча	CH ₄	53,738	50,541	48,147	46,696	44,475	43,041	43,167	43,690	44,211	
		CO ₂	3,851	3,622	3,451	3,347	3,187	3,085	3,094	3,131	3,168	
1.В.2.а.3	транспорт	CH ₄	0,521	0,335	0,427	0,503	0,390	0,341	0,391	0,326	0,297	
		CO ₂	0,047	0,030	0,039	0,046	0,035	0,031	0,036	0,030	0,027	
1.В.2.а.4	очистка	CH ₄	1,243	0,408	0,424	0,621	0,519	0,586	0,571	0,574	0,563	
1.В.2.а.6	проч.	CH ₄	0,001	0,001	0,001	0,011	0,003	0,002	0,002	0,049	0,048	
1.В.2.б Природный газ												
1.В.2.б.2	добыча	CH ₄	3,563	3,187	3,086	2,737	2,558	2,435	2,304	2,383	2,463	
		CO ₂	0,029	0,026	0,025	0,022	0,021	0,020	0,019	0,019	0,020	
1.В.2.б.4	транспортировка	CH ₄	9,798	8,761	10,872	12,918	13,789	11,935	12,166	13,002	12,963	
		CO ₂	0,022	0,020	0,025	0,029	0,031	0,027	0,028	0,030	0,029	
	хранение	CH ₄	0,642	0,574	0,713	0,847	0,904	0,782	0,798	0,852	0,850	
		CO ₂	0,003	0,002	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	
1.В.2.б.5	распределение	CH ₄	27,862	24,912	30,915	36,733	39,209	33,939	34,594	36,974	36,862	
		CO ₂	1,478	1,322	1,640	1,949	2,080	1,801	1,835	1,962	1,956	
1.В.2.б.6	проч.	CH ₄	8,550	11,410	6,970	5,960	5,760	5,760	5,760	5,760	5,760	
1.В.2.с Отвод газов и сжигание в факелах												
1.В.2.с.2.iii	в совокупности	CH ₄	0,000093	0,000057	0,000039	0,000036	0,000032	0,000034	0,000028	0,000033	0,000040	
		CO ₂	0,151900	0,093100	0,063700	0,058212	0,052381	0,055562	0,046138	0,053742	0,065046	
		N ₂ O	0,000002	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	0,000001	
1.В.2.д Проч. (просьба указать) – транспорт природного газа												
1.В.2.д	транспорт природного газа	CH ₄	7,000	5,390	11,340	9,520	11,900	11,468	14,738	12,369	12,478	
Сумма за год в эквиваленте CO ₂			2828,564	2643,100	2827,630	2919,079	2993,055	2762,246	2867,341	2904,715	2917,647	

Примечание. Для перевода значений выбросов CH₄ и N₂O в эквивалент CO₂ использованы следующие потенциалы глобального потепления: CH₄ – 25; N₂O – 298.

Использованные в разработанной модели коэффициенты выбросов отличаются от коэффициентов, примененных при подготовке государственного кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями ПГ (кадастр ПГ) за 1990–2019 гг., что приводит к росту расчетного количества выбросов ПГ в категории «летучие выбросы» сектора «Энергетика». Однако рост количества выбросов происходит как в текущем году, так и в базовом 1990 г.: по данным кадастра ПГ за 1990–2019 гг., в 1990 г. – 983,42 тыс. т CO₂ экв. против 2828,56 тыс. т CO₂

Заключение

Впервые подробно описана категория «летучие выбросы» сектора «Энергетика» Беларуси и разработана модель количественной оценки летучих выбросов ПГ от добычи нефти и природного газа и обращения с ними.

Применение разработанной модели расчетов при подготовке ежегодных инвентаризаций выбросов и поглощений ПГ (кадастров

экв.; в 2019 г. – 1137,83 тыс. т CO₂ экв. против 2917,65 тыс. т CO₂ экв.

Обязательства по сокращению количества выбросов ПГ, согласно требованиям РКИК ООН, принимаются странами к уровню базового 1990 г. Таким образом, по данным кадастра ПГ за 1990–2019 гг., выбросы ПГ в категории «летучие выбросы» сектора «Энергетика» увеличились на 15,70 % к уровню базового 1990 г., а в соответствии с расчетами, выполненными с применением разработанной методики, – на 3,15 % к уровню базового 1990 г.

ПГ) позволит как повысить качество кадастров ПГ, устранив ряд замечаний, которые сделаны группой международных экспертов под руководством Секретариата РКИК ООН при проверке [6], так и сократить уровень выбросов ПГ в категории «Летучие выбросы» сектора «Энергетика» к уровню базового 1990 г.

Библиографический список

1. Руководящие принципы проведения национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 [Электронный ресурс] // Ин-т глобальных экологических стратегий (Япония). Т. 2. Энергетика. Гл. 1. Введение. – Режим доступа: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_1_Ch1_Introduction.pdf. – Дата доступа: 30.06.2021.
2. Руководящие принципы проведения национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 [Электронный ресурс] // Ин-т глобальных экологических стратегий (Япония). Т. 2. Энергетика. Гл. 5. Летучие выбросы. – Режим доступа: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/2_Volume2/V2_4_Ch4_Fugitive_Emissions.pdf. – Дата доступа: 20.06.2021.
3. Пересмотренные руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. Энергетика [Электронный ресурс] // Ин-т глобальных экологических стратегий (Япония). – Режим доступа: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/pdffiles/rusch1-2.pdf>. – Дата доступа: 15.06.2021.
4. Нефть. Общие технические условия : ГОСТ 31378-2009. – Введ. 01.01.2013. – М. : Стандартиформ, 2009. – 8 с.
5. Мелех, Д. В. Переход на методологию уровня 2 при оценке выбросов диоксида углерода от стационарного сжигания природного газа / Д. В. Мелех // Природ. ресурсы. – 2020. – № 2. – С. 125–134.
6. Report on the individual review of the inventory submission of Belarus submitted in 2019* [Electronic resource] // United nations, FCCC/ARR/2019/BLR. – Mode of access: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/arr2019_BLR.pdf. – Data of access: 26.06.2021.

Поступила 12 июля 2021 г.

• ЧТОБЫ ПОМНИЛИ •



ВАССА ФЕДОРОВНА ШЕБЕКО (к 105-летию)

Васса Федоровна Шебеко родилась 3 сентября 1916 г. в дер. Комсеничи Шкловского р-на Могилевской обл.

В 1940 г. с отличием окончила гидротехнический факультет Белорусского политехнического института и была направлена на работу в Белорусский институт промышленного проектирования (Белпромпроект), где работала инженером-проектировщиком почти до конца июня 1941 г. Находилась в эвакуации в г. Борисоглебске (Воронежская обл.), где работала в дорожно-строительном техникуме с сентября 1941 г. по 20 июля 1944 г.: вначале преподавателем технических дисциплин, затем заместителем директора по учебной части.

После освобождения Беларуси от немецко-фашистских захватчиков в конце июля 1944 г. вернулась в Минск на прежнее место работы. В Белпромпроекте В. Ф. Шебеко трудилась до октября 1946 г., затем поступила в аспирантуру Института мелиорации, водного и болотного хозяйства. Кандидатскую диссертацию защитила в 1950 г., затем работала старшим научным сотрудником, заведующей отделом гидрологических и водохозяйственных расчетов (в дальнейшем – водохозяйственный отдел и др.). В 1968 г. Шебеко стала доктором технических наук, а через год – профессором.

За полвека работы в Белорусском НИИ мелиорации и луговодства Васса Федоровна подготовила 8 кандидатов технических наук, оказывала существенную помощь в подготовке других специалистов, была рецензентом и официальным оппонентом многих диссертационных и научных работ, редактором значительного количества монографий и сборников научных трудов, подготовленных в институте.

В. Ф. Шебеко – крупный ученый в области инженерной гидрологии, водобалансовых расчетов и регулирования водного режима на мелиорированных землях. За период своей научной деятельности Васса Федоровна сформировала профессиональный коллектив отдела гидрологических и водохозяйственных расчетов, в котором трудились П. И. Закржевский, Э. А. Брагилевская, Н. К. Вахонин, П. М. Воробьев, А. И. Киселева, А. В. Клебанов, В. П. Иванов, И. А. Чернова, Т. С. Титович и др. Работники отдела с ранней весны до наступления заморозков вели обширные водобалансовые исследования на естественных и осушенных болотах. На основе результатов были определены закономерности формирования различных составляющих водного баланса, разработаны методики расчетов, теория

и методика гидрологических инженерных расчетов и прогноза водного режима на мелиорированных землях.

В. Ф. Шебеко опубликовано около 230 научных работ, в том числе 11 монографий, около 30 пособий, руководств и методических рекомендаций по гидрологическим и водохозяйственным расчетам, которые широко внедрялись при проектировании и строительстве мелиоративных объектов в Беларуси и других регионах СССР. Результаты исследований ученого вошли в нормативные документы по проектированию и строительству мелиоративных и водохозяйственных комплексов (СНиП, РПИ и др.).

Книги Вассы Федоровны «Внутригодовое распределение и обеспеченность осадков на территории Белорусской ССР» (1962), «Испарение с болот и баланс почвенной влаги» (1965), «Гидрологический режим осушаемых территорий» (1970), «Изменение микроклимата под влиянием мелиорации болот» (1977), «Гидрологические расчеты при проектировании осушительных и осушительно-увлажнительных систем» (1980), «Водохозяйственные расчеты при мелиорации переувлажненных земель» (2000) весьма актуальны до сих пор и известны не только в Беларуси, но и за ее пределами. Также остаются значимыми подготовленные Шебеко в коллективе соавторов «Практическое пособие по гидрологическим расчетам весеннего периода при мелиорации земель БССР» (1968) и «Пособие по гидрологическим расчетам при проектировании осушительных и осушительно-увлажнительных систем» (1991).

В. Ф. Шебеко выступала с докладами на 18 международных конференциях; ее статьи опубликованы в материалах 25 международных конгрессов, симпозиумов, 35 работ – в сборниках Всесоюзных съездов по гидрологии, конференций и совещаний по мелиорации, а также в союзных журналах. Васса Федоровна активно участвовала в подготовке энциклопедического справочника «Мелиорация», где ее перу принадлежит более 40 статей.

Васса Федоровна Шебеко запомнилась как волевой, целеустремленный, принципиальный человек, ответственный труженик, чрезвычайно вдумчивый ученый. На протяжении многих лет она являлась членом различных советов, в том числе межведомственных и межреспубликанских. Ей посвящен один из стендов музея Института мелиорации.

В. Ф. Шебеко награждена орденом Трудового Красного Знамени и 6 медалями, в том числе медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», Почетной грамотой Верховного Совета БССР. Васса Федоровна Шебеко – первая в Беларуси женщина, ставшая доктором технических наук в области мелиорации. Ей присуждено почетное звание заслуженного мелиоратора Белорусской ССР, звание лауреата премии Совета Министров СССР.

НАШИ ЮБИЛЯРЫ



ДИАНА БРОНИСЛАВОВНА ДАУТИНА (к 85-летию)

Диана Брониславовна Даутина родилась 16 июля 1936 г. в г. Полоцке Витебской обл. В 1959 г. окончила агрономический факультет Белорусской государственной сельскохозяйственной академии.

В 1959–1964 гг. – младший научный сотрудник Белорусского НИИ земледелия, в 1964–1966 гг. – аспирант Белорусского НИИ мелиорации и водного хозяйства. В течение 1966–2005 гг. Диана Брониславовна работала младшим, старшим, ведущим научным сотрудником лаборатории мелиорации, использования и сохранения торфяных комплексов Белорусского НИИ мелиорации и водного хозяйства, в 1992 г. преобразованного в Белорусский НИИ мелиорации и луговодства (ныне – РУП «Институт мелиорации»). В 1970 г. успешно защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук (тема – «Меры борьбы с сорняками в посевах ячменя на торфяных почвах»).

Даутина – известный специалист в области мелиоративного земледелия на торфяных почвах. Она опубликовала около 80 работ по вопросам технологий возделывания сельскохозяйственных культур на мелиорированных землях; участвовала в разработке многочисленных рекомендаций и регламентов, направленных на повышение эффективности использования и сохранения торфяных почв.

Д. Б. Даутиной присущи порядочность и интеллигентность, упорство, профессиональное стремление к глубокому исследованию сущности изучаемых процессов. Высокий уровень компетентности в области повышения эффективности использования торфяных почв по праву снискал глубокое уважение к ней со стороны ученых и практиков.

Коллектив Института мелиорации искренне поздравляет Диану Брониславовну с юбилейной датой, желает крепкого здоровья, благополучия и оптимизма.



**ПЕТР ФИЛИППОВИЧ
ТИВО
(к 80-летию)**

Петр Филиппович Тиво родился 1 сентября 1941 г. в дер. Чернявка Крупского р-на Минской обл. В 1960 г. с отличием окончил Смиловичский сельскохозяйственный техникум, в 1960–1961 гг. работал бригадиром, агрономом отделения совхоза «Бобр» (ныне – ОАО «Кленовичи» Крупского р-на), в 1961–1964 гг. служил в Советской армии. В 1964–1970 гг. учился на факультете агрохимии и почвоведения Белорусской государственной сельскохозяйственной академии.

В Белорусском НИИ мелиорации и водного хозяйства (ныне – РУП «Институт мелиорации») Петр Филиппович работал с марта 1970 г.: вначале младшим, затем старшим, ведущим, главным научным сотрудником в отделе агрохимии, лаборатории гидрохимии и использования животноводческих стоков. В 1977 г. назначен заведующим лаборатории, в 2004 г. преобразованной в лабораторию использования осушенных минеральных земель.

В 1973–1977 гг. П. Ф. Тиво обучался в аспирантуре Белорусского НИИ мелиорации и водного хозяйства без отрыва от производства (научный руководитель – академик С. Г. Скоропанов), а в 1978 г. ему присвоена ученая степень кандидата сельскохозяйственных наук. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Экологические аспекты применения животноводческих стоков и азотных удобрений на многолетних травах».

Петр Филиппович Тиво – крупный ученый в области мелиоративного земледелия, агрохимии и экологии. Им сформулированы основные положения системы земледелия на осушенных минеральных почвах связного гранулометрического состава, выполнены многолетние исследования по оценке влияния мелиорации на свойства почв Белорусского Поозерья, разработаны приемы их рационального использования. Весом его вклад в решение проблемы утилизации животноводческих стоков (что особенно важно в связи с наличием в Беларуси многочисленных животноводческих комплексов) и больших объемов жидких и полужидких органических удобрений.

Все работы Петра Филипповича тесно связаны не только с мелиорацией осушенных минеральных земель, но и с агрохимией почв и растений. Агрохимические аспекты неизменно присутствовали в его полевых опытах и лабораторных исследованиях, что позволяло Тиво глубоко и разносторонне интерпретировать особенности роста и развития растений в сложных условиях Поозерья, охватить весь комплекс основных урожаяобразующих факторов, решать вопросы повышения продуктивности сельскохозяйственных культур комплексно и всесторонне.

В списке научных, научно-популярных и газетных публикаций П. Ф. Тиво – более 500 наименований. Поражает диапазон и разнообразие тем, рассматриваемых ученым, что свидетельствует о высоком уровне его эрудиции. Результаты его многолетних скрупулезных исследований положены в основу 30 рекомендаций, технологических регламентов и других материалов, использующихся как в научно-исследовательском процессе, так и в практике сельскохозяйственного производства. Только за последние годы Петром Филипповичем разработаны технологические приемы использования жидких органических удобрений на луговых угодьях, исключающие загрязнение почв и природных вод и инкрустацию солей на напорных трубопроводах; технология окультуривания связных почв на объектах реконструкции осушительных систем; технологические регламенты по регулированию пищевого режима осушенных минеральных почв на различных элементах рельефа; технология конвейерного производства кормов на мелиорированных минеральных почвах в условиях зернотравянопропашного севооборота и другие нормативные документы.

Ценное качество Петра Филипповича как исследователя – его постоянное внимание к экологизации разрабатываемых приемов и технологий. Неслучайно, что среди его многочисленных публикаций особое место занимают монографии «Нитраты, слухи и реальность», «Радіяця, нітраты і чалавек», «Тяжелые металлы и экология».

П. Ф. Тиво долгое время был членом Ученого совета РУП «Институт мелиорации», совета по защите докторских и кандидатских диссертаций при институте. И сейчас, находясь на заслуженном отдыхе, он продолжает оставаться членом редакционной коллегии журнала «Мелиорация».

Петр Филиппович Тиво отдал научной деятельности полвека. В этот славный юбилей хочется пожелать ему крепкого здоровья, бодрости, оптимизма и всяческого благополучия.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. В журнале печатаются оригинальные материалы, не опубликованные ранее в других печатных изданиях.

2. Статья должна быть направлена в редакцию журнала «Мелиорация» в соответствии с **Порядком представления рукописей статей** (см.: <https://niimel.by>, сайт РУП «Институт мелиорации», Журнал «Мелиорация»).

3. Статья должна быть написана на русском языке, а аннотация – на русском и английском языках.

4. Объем статьи должен составлять не менее 0,35 авторского листа (14 тыс. печатных знаков, включая пробелы между словами, знаки препинания, цифры и др.), но не более 0,5 авторского листа (20 тыс. печатных знаков), включая текст, иллюстрации, таблицы, библиографический список.

5. Представляемые материалы должны иметь следующую структуру:

индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК);

аннотацию на указанных языках (500 знаков);

ключевые слова на русском и английском языках;

введение;

основную часть, где излагается методика исследования, обсуждаются полученные результаты, представляются графики и рисунки;

заключение, завершаемое четко сформулированными выводами;

библиографический список.

6. В разделе «Введение» должен быть дан краткий обзор литературы по исследуемой проблеме, указаны не решенные ранее вопросы, сформулирована и обоснована цель работы.

7. В Основной части статьи должны содержаться: описание объекта/-ов и метода/-ов исследования, подробное освещение содержания исследований, проведенных автором/-ами. Полученные результаты должны быть обсуждены с точки зрения их научной новизны и сопоставлены с соответствующими известными данными.

8. В разделе «Заключение» должны быть в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения.

9. Библиографический список оформляется в соответствии с приказом ВАК Республики Беларусь от 08.09.2016 №206, располагается в конце статьи, источники нумеруются согласно порядку цитирования и заключаются в квадратные скобки (например: [1], [2]). Обязательно указывается общее количество страниц в книге или номера страниц в статье от ее начала до окончания. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

10. Иллюстрации, формулы, уравнения и сноски, встречающиеся в статье, должны быть пронумерованы в соответствии с порядком цитирования в тексте.

11. Тексты статей набираются кеглем 11, шрифт – Arial Narrow, междустрочный интервал – 1,2, отступ – 1. Обязательно прилагаются распечатанные на бумажных листах 2 экземпляра статьи, подписанные авторами.

12. Электронный вариант следует набирать в *Microsoft Word*, формулы – в формульном редакторе *Office*. Вставку символов выполнять через меню «Вставка\Символ». Выключку вверх и вниз (H2, H1) выполнять через меню «Формат\Шрифт\Верхний индекс», «Формат\Шрифт\Нижний индекс». Латинские буквы набираются курсивом. Греческие буквы и другие математические знаки следует брать из гарнитуры *Symbol*. Математические формулы (lim, sum, ln, sin, Re, Im и т. д.) и цифры набираются прямым начертанием.

13. Рисунки представляются в виде отдельных файлов в формате TIFF или JPEG 300—600 точек на дюйм. Текст на рисунках должен быть набран гарнитурой *Arial*, курсив. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно кегль 8). Площадь простых рисунков не должна превышать 100–150 см², размер сложных – не более 130–160 см².

14. Размерность всех величин, используемых в статьях, должна соответствовать Международной системе единиц измерения (СИ).

15. Редакция оставляет за собой право сокращать текст и вносить в него редакционные правки.

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Журнал «Мелиорация» представляет результаты научных исследований, опытно-технологических, опытно-конструкторских работ, проводимых по актуальным проблемам современной мелиорации, рекультивации, охраны и сельскохозяйственного использования мелиорированных земель, мелиоративного образования, политики мелиоративного обустройства, экологии в Республике Беларусь и странах СНГ, а также публикует иные разнообразные материалы по указанным направлениям.

Приглашаем опытных и начинающих ученых, разработчиков, инженеров, производителей мелиоративного оборудования и систем управления, а также практиков стать нашими авторами. Мы уверены, что публикуемые статьи помогут специалистам быть в курсе технологических решений в сфере мелиорации и сопутствующих процессов.

Мы готовы публиковать рекламу продукции соответствующих предприятий.

В том случае, когда присланный в редакцию материал не соответствует тематике журнала, мы стараемся рекомендовать автору более подходящие по профилю издания и по возможности оказываем посильную координационную помощь в публикации.

При подготовке статьи следует соблюдать технические требования, предъявляемые нашей редакцией к оформлению материалов. С ними можно ознакомиться на сайте niimel.by: раздел «Журнал "Мелиорация"» – блок «Авторам» – Правила для авторов.

С уважением,

редакция журнала «Мелиорация»

тел: 8 (017) 331-49-03
факс: 8 (017) 292-64-96
e-mail: info@niimel.by,
niimel@mail.ru

