

## ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.42:631.153

### ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ СОЛИГОРСКОГО ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

© 2019 г. А. Н. Червань<sup>1, \*</sup>, А. М. Устинова<sup>1</sup>, В. Б. Цырибко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт почвоведения и агрохимии, ул. Казинца, 90, Минск, 220108 Белоруссия

\*e-mail: chervanalex@mail.ru

Поступила в редакцию 06.04.2018 г.

После доработки 31.10.2018 г.

Принята к публикации 15.03.2019 г.

Приводятся результаты учета внутрипочвенного распределения химических веществ по почвенным комбинациям, как территориальным единицам инвентаризации факторов техногенного воздействия на почвенный покров. Идентификация почвенных комбинаций Солигорского горнопромышленного района Белоруссии основана на анализе морфогенетической организации структур почвенного покрова и объединяет типологические и топологические подходы в концепции адаптивно-ландшафтного земледелия. Оценены пространственно-временные изменения показателей техногенного засоления почв сельскохозяйственных земель с использованием геоинформационных средств обработки и моделирования данных. Качественная интерполяция агрохимических данных на территорию всех зон техногенного воздействия в Солигорском районе использована в качестве пространственной основы оптимизации землепользования крупных сельскохозяйственных предприятий. Рассмотрен подбор толерантных к засолению сельскохозяйственных культур в качестве меры оптимизации сельскохозяйственного использования техногенно-засоленных почв с учетом снижения экологических рисков для местного населения. В зоне наибольшего техногенного воздействия рекомендовано возделывать сахарную свеклу *Beta vulgaris*, люцерну *Medicago*, многолетние злаковые травы (тимофеевку луговую *Phleum pratense*, ежу сборную *Dactylis glomerata*, кострец безостый *Bromus inermis*).

**Ключевые слова:** агрохимические показатели, агрофизические свойства, загрязнение почв, оптимизация землепользования, сельскохозяйственные культуры

**DOI:** 10.1134/S0032180X19080069

#### ВВЕДЕНИЕ

Защита почв от антропогенного загрязнения приобретает все большее значение и, несмотря на предпринимаемые мировым сообществом усилия по контролю источников загрязняющих веществ, данная проблема сохраняется, в первую очередь в ареалах воздействия крупных промышленных предприятий добывающей и химической отраслей.

В Солигорском горнопромышленном районе источниками техногенного воздействия на почвенный покров являются функционирующие рудники ОАО “Беларуськалий”: галитовая пыль солеотвалов, утечка рассолов из шламоохранилищ и технологические выбросы загрязняющих веществ из дымовых труб сильвинитовых обогатительных фабрик, вынос солей в результате ветровой эрозии солеотвалов и растворение солеотвалов под действием атмосферных осадков с образованием избыточных рассолов [17]. Количество отходов в солеотвалах всех рудоуправлений на площади 608.3 га

составляет 760.9 млн т, совокупный вес глинисто-шламовых отходов в шламоохранилищах на площади 939.9 га – 91.0 млн т. Глинисто-солевые шламовые отходы четвертого рудоуправления отличаются от обычных глинисто-солевых шламовых отходов, что обусловлено галургическим способом производства удобрения хлористого калия [14]. Как показали предыдущие исследования, концентрация солей в этих отходах более низкая, они состоят из воды (79.4%), хлористого натрия (7.7%), хлористого калия (5.6%) и сернокислого кальция (5.3%) [3]. Хлориды кальция и магния присутствуют в шламах в количествах 0.25 и 0.42% соответственно. Поэтому основная часть лабораторных аналитических работ была направлена на определение содержания данных загрязняющих веществ в почве с последующей оценкой их пространственного распределения.

Оценка пространственно-временных особенностей перераспределения химических загрязняющих веществ в геоинформационной среде по

типизированным почвенным комбинациям позволяет в дополнение к нормативным аспектам охраны почв от деградации [5] создать территориальную основу для реализации мер по контролю техногенного засоления почв в части оптимизации типа севооборота и системы удобрения.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Природные условия Солигорского района определяются теплым умеренно влажным климатом. За год, преимущественно в теплый период, выпадает 600 мм осадков, на территории проходят среднегодовые изотермы от  $-6.1^{\circ}\text{C}$  зимой до  $18.1^{\circ}\text{C}$  летом. С севера на юг мелкохолмисто-грядовые моренные возвышения переходят в плосковолнистые моренные, моренно-зандровые и водноледниковые равнины, а также плоские древнеаллювиальные повышения, чередующиеся с крупными заболоченными понижениями [13]. Это обусловило преобладание на исследованной территории дерново-подзолистых заболоченных (Gleysols) (в основном временно избыточно увлажненных) и торфяно-болотных почв низинного типа (Histosols), доля которых составляет более 56%. Гранулометрический состав почвообразующих пород минеральных почв, как правило, рыхло- и связноупесчаный, реже легкосуглинистый.

Пространственно-временной учет показателей техногенного засоления почв реализован в границах почвенных комбинаций с использованием средств геоинформационного моделирования данных PostgreSQL/PostGIS и ArcGIS ESRI. Теория структуры почвенного покрова территориально позволила объединить функционально-генетический и сравнительно-географический методы исследования. Специализированные методы геоинформационного анализа данных предусматривали их векторизацию и растеризацию, автоматизированную переклассификацию, калькулятор растров, геостатистику с использованием встроенных программных алгоритмов.

Агрохимические анализы в почвенных образцах ( $C_{\text{орг}}$ ,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  в соотношении вода : раствору 1 : 2.5,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), исследование содержания ионов натрия, хлорид- и сульфат-ионов в воде выполняли по ГОСТ 26423-85, 26425-85, 26428-85 и по [10]. Перераспределение химических загрязняющих веществ оценивали по всем буферным зонам техногенного воздействия в Солигорском горнопромышленном районе. Профильно-катенарный метод и репрезентативные почвенные комбинации (рис. 1) в качестве ключевых участков использованы при отборе проб почвы и воды.

Для определения степени обеспеченности почвы основными элементами минерального питания, содержания гумуса и ряда других показателей

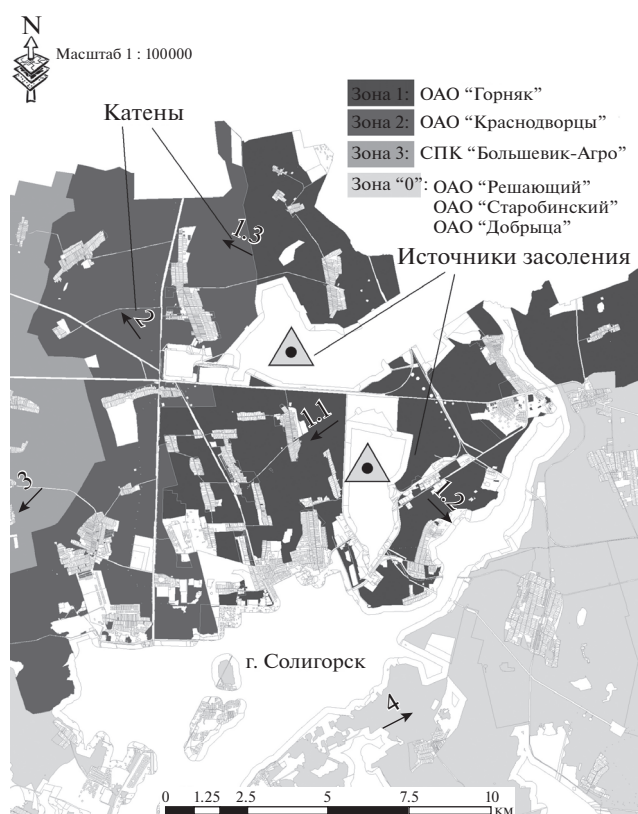


Рис. 1. Картосхема обследования сельскохозяйственных организаций в зоне техногенного загрязнения.

почвенные образцы отобрали в соответствии с положением в катене, заложенной по ПК. В каждой катене заложено не менее пяти почвенных разрезов на почвах разной степени гидроморфизма, и отобрали образцы из пахотного и подпахотного горизонта с последующим усреднением значений по каждой почвенной комбинации. Для анализа соотношения содержания форм химических элементов и их водорастворимых форм (табл. 1) использовали метод ионной хроматографии и следующую приборную базу: спектрофотометр РВ 2201 (подвижные формы Р), спектрофотокиметр Spekol-21ZV (органическое вещество), атомно-абсорбционный спектрометр Solaar ICE3000 (подвижные и валовые формы тяжелых металлов, обменная форма  $\text{Ca}^{2+}$ , обменная форма  $\text{Mg}^{2+}$ ), автоматический пламегаситель Sherwood M410 (подвижная форма К и Na), иономер I-160 (рН, нитраты), ионный хроматограф Thermo Scientific Dionex UltiMate 3000 (подвижные формы Cl и S в водной вытяжке), фотометр КФК-3 (усваиваемые растениями формы N,  $\text{NH}_4^+$ ), систему пробоподготовки VELP Scientifica DK20 для определения общего N методом титрования, дистилляционную установку VELP Scientifica UDK120. Провели сравнение содержания экотоксикантов с нормирован-

Таблица 1. Агрохимические показатели состояния исследуемых почв

Катена	рН <sub>KCl</sub>	Гумус	N <sub>общ</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N <sub>усв</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	S	Hг
		%			мг/кг							смоль(экв)/кг
1.1	6.34*	1.96	0.18	7.0	12.7	18.66	234	383	744	198.7	13.9	0.77
	6.36	1.73	0.20	6.1	13.0	17.91	231	368	734	192.7	13.8	0.70
1.2	5.63	1.92	0.21	4.1	7.2	15.77	336.4	362	768	91.3	8.6	1.40
	5.63	1.76	0.14	3.3	5.5	16.21	318	317	772	86.7	8.7	1.37
1.3	5.695	1.92	0.14	15.6	10.3	24.41	82	329	763	129.8	9.6	1.23
	5.82	1.74	0.13	13.0	10.9	20.13	78	322	720	132.6	9.3	1.09
2	4.71	2.61	0.20	10.8	8.0	22.73	140	387	683	75.2	7.1	2.66
	5.02	2.04	0.14	2.6	7.0	13.63	103	292	684	86.6	7.1	1.96
3	5.71	7.65	0.17	26.0	10.6	27.89	813	553	1049	209.5	16.6	1.19
	5.82	7.62	0.17	10.2	7.3	23.61	782	566	951	195.5	16.5	1.02
4	—	—	0.18	8.2	8.6	21.49	140	154	616	98.8	6.6	1.86
	—	—	0.15	6.0	6.4	13.82	138	143	607	114.2	6.4	1.61

\* Над чертой – средневзвешенные значения пахотного (0–25 см), под чертой – подпахотного горизонта почвы (25–45 см); S – сумма обменных оснований; Hг – гидролитическая кислотность.

ными показателями, на основании которых рассчитали показатели общего загрязнения почвы.

Кроме подвижных и усваиваемых форм химических элементов в почвах всех зон техногенного воздействия выполняли анализ валового содержания и перераспределения других макро- и микроэлементов: кальция, магния, серы, меди, цинка, марганца, железа, кобальта, свинца, никеля, кадмия, хрома и других.

Результаты химико-аналитических испытаний образцов почвы интерполировали на территорию крупных сельскохозяйственных землепользователей в границах типов земель. Для пространственных объектов применяли методы семантической и геометрической генерализации для снижения информационной нагрузки на итоговых растрах и большей достоверности за счет удаления непоказательных или незначительных по площади участков проявления засоления почв.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Учет агрофизических свойств и агрохимических показателей почв, как факторов техногенного засоления.** Миграционная способность элементов и их доступность растениям определяются степенью их подвижности [9]. Подвижность элемента в почве зависит от его химических свойств и почвенных условий (гранулометрического состава, гидролитической кислотности, количества и фракционного состава гумуса, гидроморфизма). В связи с этим анализировали все основные формы нахождения каждого элемента (валовые, обменные, водорастворимые) и их соотношения по горизонтам репрезентативных почв в каждой зоне техногенного воздействия. Использование предварительно иденти-

фицированных почвенных комбинаций (ПК) с качественной оценкой естественной способности к самоочищению способствовало корректной интерполяции аналитических данных на территорию всего горнопромышленного района. ПК содержат необходимую и достаточную информацию, с одной стороны, о почвенно-ресурсном потенциале по значению бонитета почвенных разновидностей, с другой – об устойчивости комбинации к тепловому и химическому воздействию в зависимости от агрофизических свойств и агрохимического состояния почв.

Исходными данными интерполяции степени засоления в границах предварительно идентифицированных ПК послужили результаты аналитических испытаний 98 почвенных образцов и проб воды 8 ключевых участков. Исследованиями были охвачены все почвенные разновидности репрезентативных ПК. При закладке почвенно-геохимических катен по отбору почвенных проб в каждой зоне загрязнения учитывали границы почвенных комбинаций и видов земель.

Согласно разработанной в Институте почвоведения и агрохимии градации для дерново-подзолистых почв, развивающихся на водно-ледниковых суглинках, оптимальной считается плотность пахотного горизонта 1.15–1.25 г/см<sup>3</sup>, на супесях – 1.25–1.35, на песках – 1.34–1.45 г/см<sup>3</sup>, пористость – 47–53, 47–50 и 46–48% соответственно [18]. Не приводя полученные аналитические данные агрофизического состояния всех репрезентативных почв слоя 0–50 см, отметим, что значения агрофизических показателей гумусово-аккумулятивного горизонта суглинистых почв (катена 2, рис. 1) характеризуются как допустимые: плотность –

1.26–1.42 г/см<sup>3</sup>, пористость – 45–51%. На глубине 20–50 см отмечено уплотнение на 0.15 г/см<sup>3</sup> и снижение пористости на 5% по сравнению с верхним горизонтом. Агрофизическое состояние иллювиального горизонта супесчаных почв ухудшается по сравнению с пахотным – плотность повышается до 1.40–1.60 г/см<sup>3</sup>, а пористость снижается до 38–46%. Оптимальные значения плотности (1.28–1.38 г/см<sup>3</sup>) и пористости (49–50%) отмечены только на почвах песчаного гранулометрического состава (катены 1.3 и 4).

В связи с мощным снежным покровом и большим количеством осадков в марте экспериментального 2017 г., влажность пахотного горизонта дерново-подзолистых почв составила 20–38 или 50–100% полной влагоемкости. На глубине более 20 см отмечается снижение влажности до 13–24%. В ранневесенний период гумусово-аккумулятивный горизонт исследуемых почв характеризовался оптимальной влагообеспеченностью (запасы общей влаги 56–85 мм), а ниже лежащий – оптимальной и повышенной (62–111 мм), обуславливающей неблагоприятное для роста и развития растений снижение пористости аэрации ниже 15%. В целом отмечается улучшение всех показателей агрофизического состояния с увеличением содержания органического вещества.

За счет попадания в почву из атмосферы грубодисперсных фракций аэрозолей, входящих в состав выбросов обогатительных силивинитовых фабрик, происходит подкисление почв. По степени кислотности почвы изменяются от близких к нейтральным к среднекислым. Так, пахотный горизонт почв первой зоны загрязнения (катены 1.1–1.3) характеризуется кислотностью, близкой к нейтральной с  $pH_{KCl}$  6.34. По мере удаления от терриконов (катены 2–3)  $pH_{KCl}$  изменяется от 5.63 до 4.71, от слабокислых к среднекислым. Аналогичная закономерность установлена и в подпахотном горизонте почв.

Содержание органического углерода в гумусово-аккумулятивном горизонте почв исследуемой территории изменяется в пределах 1.92–7.65%. Среднее содержание органического углерода в дерново-подзолистой почве (1.73–1.96%) характерно для катен с наиболее высокой техногенной нагрузкой (1.1–1.3). По мере повышения степени увлажнения почвенного покрова содержание его увеличивается от 2.61% в дерново-подзолистых почвах (катена 2) до 7.65% в торфянисто-глеевых (катена 3). Почвы катены 3 отличаются высоким содержанием органического вещества (7.65%), что объясняется их органо-минеральным составом. Низкое содержание органического углерода в дерново-подзолистых почвах автоморфных геосистем связано в том числе с развитием водной эрозии почвы и более активной минерализацией. В иллювиальном горизонте содержание его меня-

лось от среднего в почвах катен 1.1–1.3 к высокому – в почвах, расположенных в зоне минимального засоления и фоновой территории, что объясняется большей степенью гидроморфизма и менее интенсивной системой земледелия.

По содержанию общего азота особо выделилась торфянисто-глеевая почва, где содержание общего азота в горизонте 0–40 см составляет 0.85%. В минеральных дерново-подзолистых почвах разного гранулометрического состава содержание общего азота находится в пределах от 0.14 до 0.21%.

Содержание подвижных форм азота очень динамично и зависит от увлажнения, аэрации и температуры почвы. В торфянисто-глеевой почве по сравнению с дерново-подзолистой содержание нитратного азота выше на 10.5–22 мг/кг. Отмечено, что в зонах меньшего влияния техногенного засоления содержание нитратного азота в почвах больше, чем в зонах расположения рудоуправлений. Это обусловлено повышенной степенью увлажнения обследуемых почв фоновых территорий и большей интенсификацией системы удобрения. Превышение уровня содержания аммонийного азота  $NH_4^+$  над нитратным  $NO_3^-$  в гумусово-аккумулятивном горизонте дерново-подзолистых почв первой зоны засоления составляет 82%, что связано с преобладанием аммонификации над нитрификацией. Фоновое содержание аммонийного азота приближается к такому нитратного и составляет на глубине 0–25 см 8.64 мг/кг, глубже – 6.41 мг/кг. Содержание усваиваемого азота изменялось в той же закономерности, что и нитратной, и аммонийной форм. Минимальные значения (15.77–18.66 мг/кг) отмечены в почвах, расположенных вблизи рудоуправлений (катены 1.1–1.2). В почвах второй и третьей зоны засоления содержание азота увеличивалось до 22.73–27.89 мг/кг. В торфянисто-глеевой почве количество усваиваемого азота достигало максимального значения и составляло 61.16 мг/кг, что превышает фоновое значение в 2.8 раза.

Практически все анализируемые почвы отличаются повышенным и высоким содержанием подвижных соединений фосфора и калия. Так, в пахотных горизонтах дерново-подзолистых почв, расположенных вблизи рудоуправлений, содержание  $P_2O_5$  составило 234.4 и 336.4 мг/кг (повышенное и высокое), в подпахотных – 230.7 мг/кг (повышенное), что больше по сравнению с фоном на 68.0%. Во второй и третьей зонах техногенного воздействия содержание  $P_2O_5$  характеризуется как низкое и повышенное соответственно [8]. В дерново-подзолистых почвах зоны засоления 3 содержание соединений фосфора и калия характеризуется, как очень высокое, что обусловлено повышенным внесением их в форме удобрений и мелиорантов.

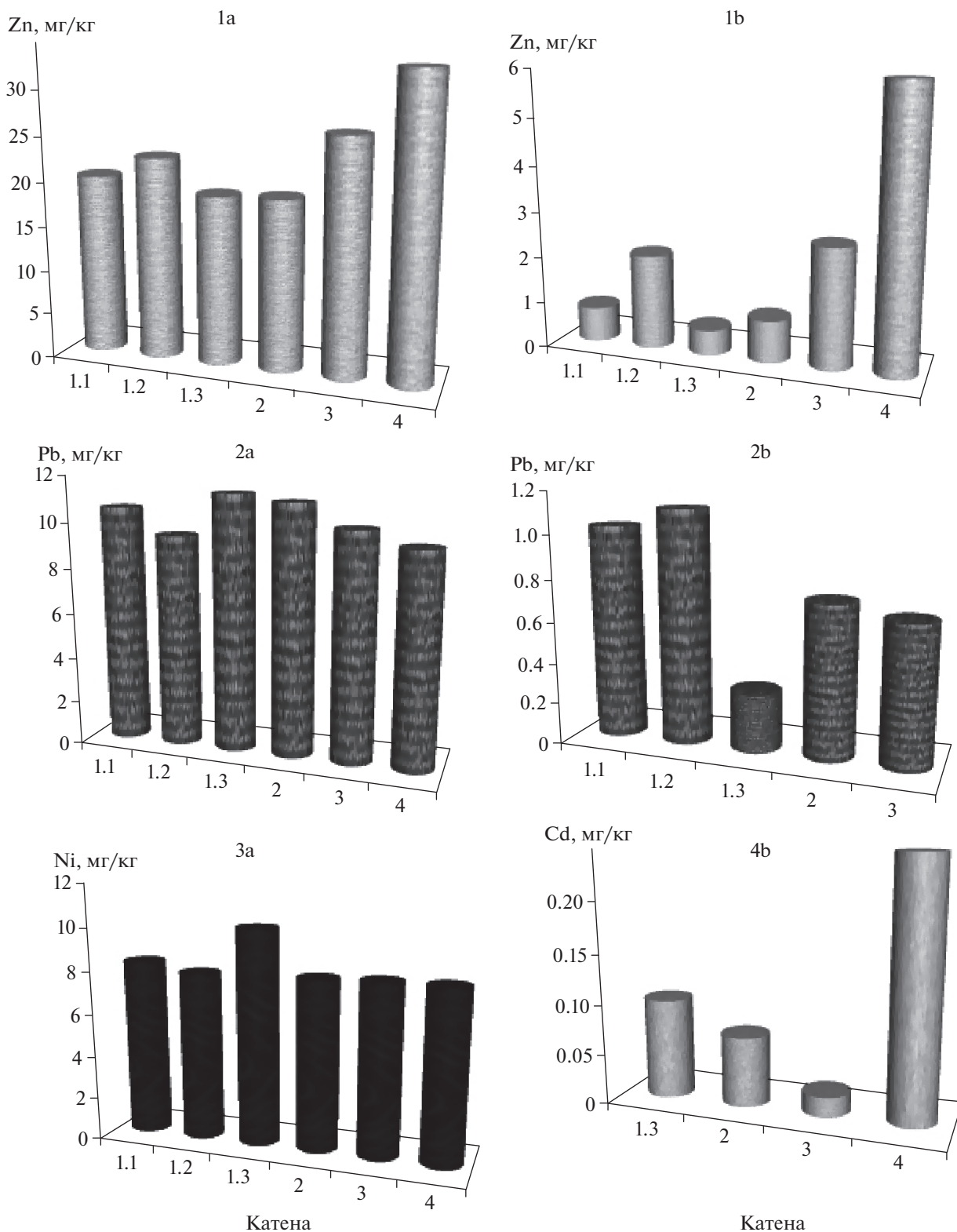


Рис. 2. Фактическое содержание элемента в почве Zn (1), Pb (2), Ni (3) и Cd (4): а – валовое, б – подвижные формы.

По всем зонам техногенного воздействия на рис. 2 частично представлены фактическое валовое содержание в почвах с учетом подвижных форм

цинка Zn, свинца Pb, никеля Ni и кадмия Cd. Проведено сопоставление выявленных содержаний экотоксикантов с нормативными значениями,

рассчитан показатель суммарного загрязнения почв по формуле Саета:

$$Z_c = \sum K_k - (n - 1),$$

где  $K_k$  – коэффициенты концентрации элементов – отношение содержания элемента к его фоновому содержанию, а  $n$  – число учитываемых элементов, с последующим сопоставлением полученных значений с оценочной шкалой, в соответствии с которой опасной считается величина свыше 32 условных единиц [11]. При  $Z_c \leq 16$  загрязнение по ранее разработанным в Институте почвоведения и агрохимии нормативным диапазонам считается допустимым; при  $16 < Z_c < 32$  – умеренно опасным; при  $32 \leq Z_c < 128$  – высоко опасным [10]. Также определялась доля подвижных форм металлов от их валовых концентраций, достигающая наибольших значений при анализе меди, кадмия и свинца (более 30%). Средневзвешенные концентрации валовых форм большинства анализируемых элементов не превышали фоновых значений. Повышенное содержание кадмия и свинца отмечается в почвенном покрове в непосредственной близости от промышленных зон калийных комбинатов и автодорог, несмотря на схожие показатели буферности обследуемых почв по отношению к тяжелым металлам [7]. В единичных случаях концентрации тяжелых металлов в пахотном горизонте дерново-подзолистых почв составляли 65–75% от ПДК.

Оценка результатов аналитических испытаний проб почв во всех зонах техногенного воздействия указывает за незначительным исключением на уровень загрязнения ниже значений ПДК, но выше местных фоновых значений.

Оценочной характеристикой содержания в почвенном поглощающем комплексе катионов является сумма поглощенных оснований ( $S$ ). В дерново-подзолистых почвах значение изменялось от 8.6 до 35.2 смоль(экв)/кг. В почвах, находящихся вблизи рудоуправлений, величина  $S$  составила 13.9 смоль(экв)/кг, что почти вдвое выше содержания в почвах второй зоны засоления. Сходные данные характерны и для более глубоких горизонтов почвы.

Определение гидролитической кислотности (Нг) почв обусловлено возможностью решения практических задач, связанных с применением удобрений, известкованием и другими агрохимическими приемами снижения техногенного засоления почв. Гидролитическая кислотность анализируемых почв в гумусово-аккумулятивном горизонте варьировала от 0.77 до 2.66 смоль(экв)/кг в дерново-подзолистых почвах и до 20.48 смоль(экв)/кг – в торфянисто-глеевой, что указывает на необходимость химических мелиоративных мероприятий в этой зоне для снижения фитотоксичности. С целью дополнительного подтверждения внут-

рипочвенного перераспределения загрязняющих веществ по почвенным комбинациям, в каждой из них отобраны пробы воды из мелиоративных каналов или локальных ручьев. Выполненный анализ состояния качества поверхностных вод указывает на превышение ПДК в воде подвижных форм магния, марганца и калия в первой зоне техногенного воздействия в соответствии с гигиеническими нормативами Белоруссии. Превышение содержания нитратов и фосфатов характерно для всех буферных зон Солигорского горнопромышленного комбината, при этом для зоны близлежащей к соледвалам и сильвинитовым обогатительным фабрикам содержание нитратов превышает ПДК более чем в 3 раза. Соответствующее превышение по фосфатам в третьей зоне, где добавляется воздействие средств химизации растений и интенсивной системы удобрения, составляет более чем 10 раз.

**Закономерности миграции загрязняющих веществ в почвенном покрове.** Анализ образцов почв весеннего отбора свидетельствует, что максимальное содержание катионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и анионов  $\text{Cl}^-$ , и  $\text{SO}_4^{2-}$  фиксируется в верхнем слое 0–5 см (табл. 2, 3). Установлено, что содержание водорастворимых форм практически всех элементов в почвах значительно выше фоновых значений, тем не менее, не удовлетворяя диагностическим критериям существования солонцового процесса [16]. Однако, если повышенное содержание водорастворимых форм калия, кальция и магния в профиле почв в целом можно объяснить систематическим применением минеральных удобрений и известкованием почв, то высокие концентрации  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Cl}^-$  напрямую связаны с техногенным загрязнением.

Загрязняющие соединения, выпавшие на поверхность почвы, мигрируют в вертикальном и горизонтальном направлениях. Во многом их концентрация и миграция по почвенному профилю определяются степенью гидроморфизма почвы (рис. 3). Анализ распределения хлоридов по профилю различных по увлажнению почв в геохимической катене 1.1, свидетельствует о том, что по мере перехода от дерново-палево-подзолистой супесчаной почвы нормального увлажнения к дерново-подзолистым легкосуглинистой глееватой и глеевой почвам наблюдается увеличение концентрации хлоридов практически во всех горизонтах почвенного профиля. Особенно хорошо прослеживается эта закономерность в гумусово-аккумулятивных горизонтах, что подтверждает активное взаимодействие хлорид-ионов с органическими веществами с образованием хлорорганических соединений *in situ* [1]. Содержание хлоридов в пахотном горизонте почв катены составляло от 20.0 мг/кг в дерново-палево-подзолистой автоморфной супесчаной почве до 65.0 мг/кг – в

**Таблица 2.** Содержание водорастворимых компонентов в пахотном горизонте почв в зоне влияния ОАО “Беларуськалий” (ранневесенний период отбора), метод водной вытяжки 1 : 5

Расстояние от комбината, м	Глубина, см	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
		мг/кг				
150 (катены 1.1.–1.3)	0–5	19.6	57.6	18.0	13.7	33.5
	5–10	4.9	59.5	20.1	8.1	25.9
	11–25	4.4	54.8	19.3	8.2	13.0
200 (катены 1.1.–1.3)	0–5	18.3	54.6	15.5	11.9	37.2
	5–10	7.3	52.2	15.1	7.6	17.1
	11–25	4.5	55.3	18.5	9.8	11.6
300 (катены 1.1–1.3)	0–5	16.8	63.6	19.0	11.1	17.6
	5–10	5.8	55.8	18.7	5.8	17.1
	11–25	4.2	58.4	21.0	7.2	8.2
500 (катена 2)	0–5	13.4	53.8	19.2	8.0	16.5
	5–10	2.8	51.9	20.5	5.7	25.0
	11–25	1.9	52.7	20.9	5.5	13.9
2000 (катена 3)	0–5	12.8	55.6	15.9	16.0	14.8
	5–10	11.8	56.2	15.0	7.6	8.3
	11–25	14.2	55.3	17.9	8.4	6.9
Фон (катена 4)	0–25	5.0	30	5.0	10	10

дерново-подзолистой глееватой суглинистой и 225.0 мг/кг в дерново-подзолистой глеевой суглинистой почве, что выше фонового содержания хлоридов в дерново-подзолистых почвах в 2, 6 и 22 раза соответственно. В дерново-подзолистых автоморфных и временно избыточно увлажненных почвах четко прослеживается увеличение содержания хлоридов вниз по профилю с аккумуляцией их в иллювиальном горизонте. Эта закономерность объясняется внутрпочвенной миграцией хлоридов с латеральным стоком влаги [6], влияние которого в наибольшей степени проявляется в глеевых горизонтах дерново-подзолистых суглинистых почв.

Исследования показывают, что валовое содержание натрия в слое 0–25 см примерно одинаково и составляет 3100–3500 мг/кг почвы. С глубиной общее содержание этого элемента уменьшается, и на глубине 60–70 см составляет 2200–2700 мг/кг почвы (табл. 3).

Подвижность натрия в почве и доступность его растениям определяется более мобильными формами его нахождения: обменной и водорастворимой. Доля подвижного натрия (обменного и водорастворимого в совокупности) от общего содержания в пахотном горизонте увеличивается от дерново-подзолистой связносупесчаной автоморфной до глеевой легкосуглинистой почвы от 1.5 до 5.0% соответственно. В дерново-подзолистых супесчаных автоморфной и временно избыточно увлажненной почвах концентрация водорастворимого натрия превышает фоновые

значения в 2.5 раза, в глееватой – в 4.4, а в глеевой – в 8.1 раза. Распределение натрия по профилю изучаемых почв также свидетельствует о повышенных концентрациях этого элемента по сравнению с фоновым. В пахотном горизонте автоморфной почвы водорастворимый натрий составляет 0.78%, во временно избыточно увлажненной – 0.89, в глееватой – 1.3%, а в глеевой достигает 2.6% от его валового содержания.

Натрий в изучаемых почвах отличается высокой степенью миграции. Более половины от суммы обменных и водорастворимых форм (52.6–52.7%) занимает водорастворимая форма – это отмечено во всех генетических горизонтах изучаемых почв. В фоновых почвах, расположенных в третьей зоне воздействия ОАО “Беларуськалий”, доля водорастворимого натрия в пахотном горизонте составляет 21–37% от суммы обменного и водорастворимого.

Модели пространственно-временного распределения загрязняющих соединений в почвенном покрове исследуемой территории разработаны с учетом фактического содержания основных водорастворимых элементов в пахотном и подпахотном горизонтах почвы и геосистемной инвентаризации структуры почвенного покрова по почвенным комбинациям. По административно-территориальным единицам (сельсоветам) получены качественные различия устойчивости почвенного покрова к техногенному засолению в разных метеорологических условиях. Это поз-

**Таблица 3.** Распределение натрия по профилям дерново-подзолистых почв разной степени увлажнения

Горизонт, глубина, см	Фракционный состав Na <sup>+</sup> в почве				
	валовое содержание, мг/кг	обменный и водорастворимый, мг/кг	водорастворимый		
			мг/кг	доля от обменного и водорастворимого, %	доля от валового, %
Дерново-палево-подзолистая супесчаная почва, развивающаяся на связных супесях, подстилаемых с глубины 0.5 м моренным суглинком					
Ап, 0–24	3200	48.3	25.4	52.6	0.78
А2, 25–40	3300	41.9	22.1	52.7	0.67
А2В1, 41–50	2700	50.6	26.6	52.7	1.0
В1, 51–60	2200	47.0	24.7	52.5	1.1
Дерново-палево-подзолистая временно избыточно увлажненная супесчаная почва, развивающаяся на связных супесях, подстилаемых с глубины 0.5 м моренным суглинком					
Ап, 0–10	2800	46.3	24.4	52.7	0.8
Ап, 11–33	3100	44.4	23.4	52.7	0.75
А2g, 34–50	3400	40.1	21.1	52.6	0.62
Дерново-подзолистая глееватая суглинистая почва, развивающаяся на лёссовидных легких суглинках, подстилаемых с глубины 0.4 м моренным суглинком					
Ап, 0–20	3400	83.8	44.1	52.6	1.3
А2В1g, 21–42	3500	59.8	31.5	52.7	0.9
В1g, 43–70	3300	70.8	37.3	52.7	1.1
ВС, >75	2700	49.4	26.0	52.6	0.96
Дерново-подзолистая глеевая суглинистая почва, развивающаяся на лёссовидных легких суглинках, подстилаемых с глубины 0.8 м моренным суглинком					
Ап, 0–10	3100	153.5	80.8	52.6	2.61
Ап, 11–18	3000	97.6	51.4	52.7	0.9
А2g, 19–35	3200	83.6	44.0	52.6	1.37
А2g, 36–70	2400	92.6	48.7	52.6	2.0
В1g, >70	2500	43.1	22.7	52.7	0.9

воляет территориально локализовать меры по предотвращению загрязнения почв, в том числе техногенного засоления почвенного покрова и поверхностных вод.

**Снижение урожайности сельскохозяйственных культур в условиях засоления.** Избыточное содержание ионов Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> в почве задерживает появление всходов растений, растягивает период от появления до полных всходов. Высокие концентрации водорастворимых солей Na и Cl ухудшают фенольный обмен в растительном организме, что приводит к торможению роста и развития растений. В условиях хлоридно-натриевого засоления резко снижается продуктивность растений.

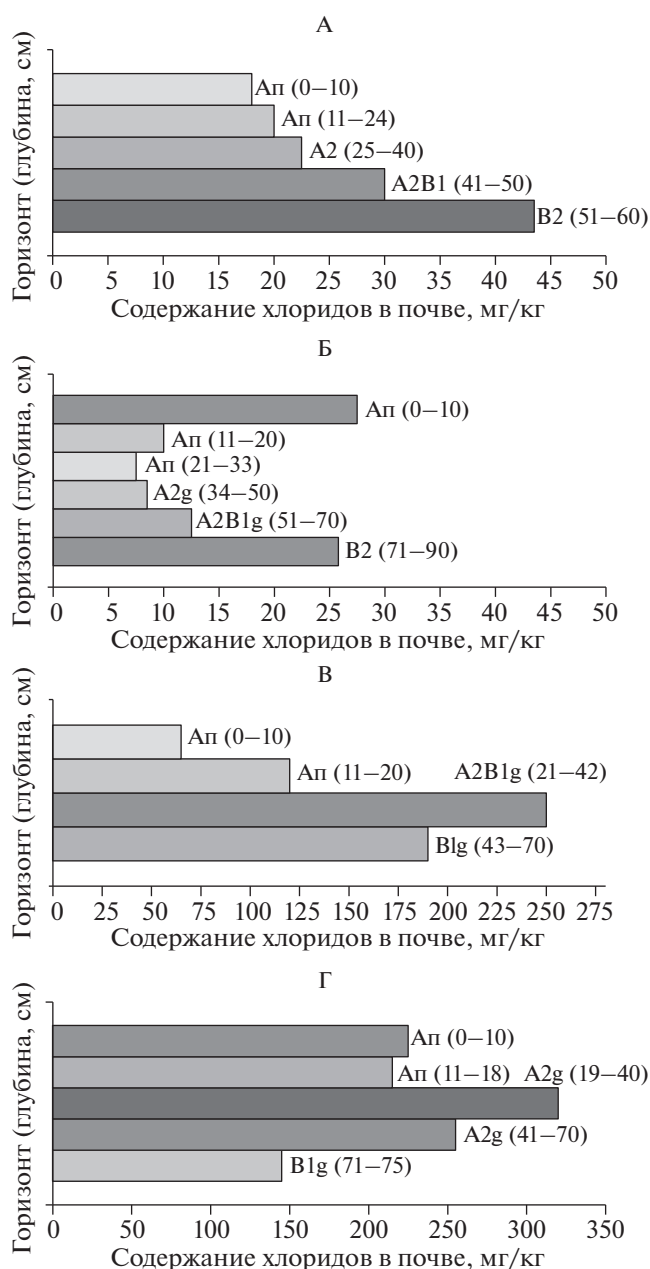
Достоверное уменьшение урожайности яровой пшеницы и ярового ячменя по литературным источникам в Солигорском горнопромышленном районе отмечено при содержании водорастворимого натрия более 120 мг/кг почвы [4]. Дальнейшее увеличение загрязнения почв Na до концентрации его водорастворимых форм в диапазоне 250–300 мг/кг оказывает явно выражен-

ные визуально диагностируемые признаки угнетения растений, при которых урожай яровой пшеницы уменьшается на 35%, ярового ячменя – на 30%. При загрязнении почвы хлором достоверная потеря урожая пшеницы и ячменя наблюдается при содержании водорастворимого Cl<sup>-</sup> более 200 мг/кг почвы. Увеличение концентрации Cl<sup>-</sup> до 350–400 мг/кг вызывает снижение урожайности культур соответственно на 20 и 28% [4].

Отклик растений на химически загрязненных почвах определяется, в первую очередь, биологическими свойствами растений, их адаптацией к почвенно-экологическим условиям в местах постоянного произрастания. Толерантность высших растений к химическим загрязняющим веществам и механизмы, препятствующие их избыточному накоплению в органах растений, сводятся, в основном, к двум типам [15]:

– исключение поступления элементов в клетку, в результате чего растение избегает токсического воздействия на физиологические процессы (особое значение принадлежит плазматической





**Рис. 3.** Распределение хлоридов по профилю дерново-подзолистых почв разной степени увлажнения (геохимическая катена): А – дерново-палево-подзолистая супесчаная почва, развивающаяся на связных супесях, подстилаемых с глубины 0.5 м моренным суглинком; Б – дерново-палево-подзолистая временно избыточно увлажненная супесчаная почва, развивающаяся на связных супесях, подстилаемых с глубины 0.5 м моренным суглинком; В – дерново-подзолистая глееватая суглинистая почва, развивающаяся на лёссовидных легких суглинках, подстилаемых с глубины 0.4 м моренным суглинком; Г – дерново-подзолистая глеевая суглинистая почва, развивающаяся на лёссовидных легких суглинках, подстилаемых с глубины 0.8 м моренным суглинком.

мембране, которая служит селективным буфером на пути поступления элементов в клетку);

– запуск внутриклеточных механизмов детоксикации элементов и выделение их из организма (органические кислоты, специфические белки – металлотioniны, пептиды, связывающие металлы в живых клетках, фитохелатины, глутатионы – соединения, образующие с металлами устойчивые комплексы и инактивирующие их физиологическую активность).

**Подбор толерантных к засолению культур.** В условиях природного хлоридно-натриевого, сульфатного и смешанного типов засоления возделываемые на них культуры по-разному переносят концентрации солей [2]. При незначительном засолении снижается урожайность только некоторых плодовых и овощных культур, слабую и среднюю степень засоления (доля солей до 0.6% от сухой массы почвы при хлоридно-натриевом засолении) хорошо переносят все зерновые культуры, просо *Panicum*, тимофеевка *Phleum pratense*, ежа сборная *Dactylis glomerata* и некоторые другие культуры. Высокая степень засоления практически не влияет на урожайность костреца безостого *Bromus inermis*, сахарной свеклы *Beta vulgaris*, райграса французского *Arrhenatherum elatius* [19].

На основании литературных данных и результатов исследования возделывания сельскохозяйственных культур в СПК “Горняк” выявлено, что на почвах с повышенным и высоким содержанием водорастворимого натрия и хлоридов рекомендуется возделывать сахарную свеклу *Beta vulgaris*, люцерну *Medicago*, многолетние злаковые травы (тимофеевку *Phleum pratense*, ежу сборную *Dactylis glomerata*, костреца безостый *Bromus inermis*). В сельскохозяйственных организациях второй и третьей зоны техногенного воздействия набор культур более широкий, определяющий возможность применения зернотравяных и зернотравяно-пропашных севооборотов.

В условиях хлоридно-натриевого загрязнения при изменении реакции почвенной среды ухудшается азотное питание растений, усвоение азота растениями затрудняется в кислой и щелочной среде. При повышении кислотности почвы угнетается поглощение катионов в порядке:  $K^+ > NH_4^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$ . В аналогичном порядке засоление влияет на водно-физические свойства [12], определяя продуктивную способность почв. Подщелачивание почвенной среды способствует закреплению в почве и снижению доступности растениям Fe и большинства микроэлементов (Mn, Cu, Zn, Co). В этих условиях важно использовать факторы, стимулирующие физиологические процессы в растительном организме и способствующие благоприятному росту и развитию растений, в том числе микроэлементы и биологически активные вещества, которые зачастую ста-

новятся фактором, лимитирующим получение высоких и стабильных урожаев.

В СПК “Горняк” Солигорского района на дерново-палево-подзолистой временно избыточно увлажненной суглинистой почве, развивающейся на лёссовидных суглинках, подстилаемых моренным суглинком с глубины 0.6 м, ранее проведены полевые опыты по изучению приемов снижения негативного действия загрязняющих веществ на продуктивность ярового ячменя Сябра и яровой пшеницы Тризо [3]. На дерново-подзолистых супесчаных почвах с высоким и средним уровнем плодородия при концентрации в почве водорастворимого натрия 70–120 мг/кг и хлоридов 140–200 мг/кг (на минимально засоленных почвах) особое внимание необходимо уделять оптимизации системы удобрения яровых зерновых культур, использовать бесхлорные комплексные удобрения, не приводящие к увеличению концентрации солей. На почвах с содержанием водорастворимого натрия более 120 мг/кг и хлоридов более 200 мг/кг возделывание яровых зерновых культур нецелесообразно в связи со значительным сокращением их урожайности. На почвах с высокой степенью загрязнения хлоридами и натрием (содержание элементов превышает фоновые в 40–100 раз и более) производство растениеводческой продукции на продовольственные и кормовые цели не рекомендуется.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная оценка особенностей распределения валового содержания и водорастворимых форм химических соединений в почвах сельскохозяйственных земель Солигорского горнопромышленного района позволила сформировать пространственно-временные модели устойчивости почв к техногенному воздействию, в том числе к засолению.

Показатели агрохимического состояния репрезентативных почв, интерполированные по типизированным почвенным комбинациям в геоинформационной базе данных, составили территориальную основу оптимизации землепользования крупных сельскохозяйственных предприятий района. Геосистемный учет перераспределения химических загрязняющих веществ способствует формированию адаптивно-ландшафтных систем земледелия в части подбора толерантных к засолению сельскохозяйственных культур и соответствующих систем удобрения.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках реализации регионального плана действий Евразийского почвенного партнерства (программа малых грантов) по договору от 20.09.2016 г. № GCP/GLO/650/RUS и в

рамках научного проекта БРФФИ № Б17PM-061 от 01 июня 2017 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Водяницкий Ю.Н., Макаров М.И.* Хлороорганические соединения и биогеохимический цикл хлора в почвах (обзор) // Почвоведение. 2017. № 9. С. 1065–1073.
2. *Гасанов Г.Н., Усманов Р.З., Мусаев М.Р., Абасов М.М.* Экологическое состояние и возможности фитомелиорации засоленных почв Западного Прикаспия // Сельскохозяйственная экология. 2007. № 1. С. 79–85.
3. *Головатый С.Е., Ковалевич З.С., Лукашенко Н.К.* Возделывание сельскохозяйственных культур в условиях хлоридно-натриевого загрязнения почв. Минск, 2010. 28 с.
4. *Головатый С.Е., Ковалевич З.С., Лукашенко Н.К., Вишняков Р.В.* Пространственное распределение химических загрязнителей в почвах территорий, прилегающих к предприятиям ПО “Беларуськалий”. Сообщение 2. Натрий // Почвоведение и агрохимия: науч. журнал. 2008. № 2(41). С. 244–255.
5. Деградация и охрана почв / Под ред. Добровольского Г.В. М.: Изд-во МГУ. 2002. 654 с.
6. Засоленные почвы России / Отв. ред. Шишов Л.Л., Панкова Е.И. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2006. 854 с.
7. *Ильин В.Б.* Оценка буферности почв по отношению к тяжелым металлам // Агрохимия. 1995. № 10. С. 109–113.
8. *Лапа В.В., Смян Н.И., Богдевич И.М., Черныш А.Ф., Рак М.В., Цыганов А.Р.* Справочник агрохимика. Минск: Белорусская наука, 2007. 390 с.
9. *Логинов В.Ф.* Природная среда Беларуси. Минск, 2002. 246 с.
10. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 53 с.
11. *Сает Ю.Е., Ревич, Б.А., Янин Е.П.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 319 с.
12. *Савич В.И., Черников В.А., Садуакасов Н.М., Гукалов В.В.* Агроэкологическая оценка изменения засоления почв во времени и в пространстве // Международный сельскохозяйственный журнал. 2018. № 2. С. 45–48.
13. *Смян Н.И., Цытрон Г.С., Шибут Л.И., Бубен И.И.* Почвенный очерк Солигорского района Минской области. Минск: Белгипрозем, 2003. 19 с.
14. *Смычник А.Д., Богатов Б.А., Шемет С.Ф.* Геоэкология калийного производства. Минск: Юнипак, 2005. 204 с.
15. *Торшин С.П.* Влияние естественных и антропогенных факторов на формирование микроэлементного состава продукции растениеводства. Автореф. дис. ... д-ра. биол. наук. М., 1998. 32 с.
16. *Хитров Н.Б.* Выбор диагностических критериев существования и степени выраженности солонцового процесса в почвах // Почвоведение. 2004. № 1. С. 18–31.
17. *Хомич В.С., Савченко С.В., Романкевич Ю.А., Парфёнов В.В., Бакарикова Ж.В., Шнак Е.Г., Ересько М.А.,*

- Богдевич И.М.* Земельные ресурсы и почвы // Состояние природной среды Беларуси: экологический бюллетень. 2013. С. 201–229.
18. *Черныш А.Ф., Червань А.Н., Качков Ю.П., Башкинцева О.Ф., Бачила С.С., Панасюк О.Ю.* О создании единой системы экологического нормирования допустимой антропогенной нагрузки на почвенный покров агроландшафтов Беларуси // Земля Беларуси. № 1. 2014. С. 42–46.
19. *Efroymson R.A., Sample B.E., Suter G.W.* Bioaccumulation of inorganic chemicals from soil by plants: *spiked soils vs. field contamination or background* // Human-and-Ecological-Risk-Assessment. 2004. V. 10. № 6. P. 1117–1127.

## Spatiotemporal Changes of Soil Salinization in the Soligorsk Mining Region

A. N. Chervan<sup>a,\*</sup>, A. M. Ustinova<sup>a</sup>, and V. B. Tsyrybko<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute for Soil Science and Agrochemistry, ul. Kazintsa 90, Minsk, 220108 Belarus*

*\*e-mail: chervanalex@mail.ru*

The results of the assessment of the distribution of chemicals by soil combinations as territorial units of the inventory of the factors of anthropogenic impact on the soil cover are presented. The identification of soil combinations in the Soligorsk mining region of Belarus is based on the analysis of the morphogenetic organization of soil cover patterns and combines typological and topological approaches within the framework of the concept of adaptive landscape farming. The spatiotemporal changes of indicators of anthropogenic salinization of soils in agricultural lands were estimated using geoinformation tools for data processing and modeling. Qualitative interpolation of agrochemical data on the areas subjected to anthropogenic impact in the Soligorsk region is used as a spatial basis for optimizing land use of large agricultural enterprises. The selection of crops tolerant to salinization as a measure to optimize the agricultural use of human-salinized soils and reduce the environmental risks for the local population is discussed. In the zone of the greatest anthropogenic impact, it is recommended to cultivate sugar beet *Beta vulgaris*, lucerne *Medicago*, and perennial grasses (timothy *Phleum pratense*, cocksfoot *Dactylis glomerata*, and smooth brome grass *Bromus inermis*).

*Keywords:* agrochemical indicators, agrophysical properties, soil pollution, land use optimization, crops