

ЭТАПЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ОЧИСТИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОРОШЕНИЯ СТОЧНЫМИ ВОДАМИ ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

И.П. Кружилин¹, академик РАН,
Т.А. Гамм², доктор сельскохозяйственных наук

¹Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия,
400002, Волгоград, ул. Тимирязева, 9

²Оренбургский государственный университет,
460018, Оренбург, проспект Победы, 13
E-mail: hammtam@mail.ru

Исследована динамика очистительной способности земледельческих полей орошения сточными водами газоперерабатывающего комплекса. Показано, что при орошении нормой по 480 м³/га за 5-7 поливов в почву ежегодно поступает 2,98-4,17 т/га загрязнителей, которые остаются в почвогрунтах зоны аэрации и способствуют осолонцеванию, ошелачиванию почвы и, как следствие, снижению урожайности сельскохозяйственных культур. При этом кальций из верхних слоев почвы выносятся в более глубокие горизонты, формируя новый геохимический барьер. В условиях слабого оттока грунтовых вод отмечены подъем их уровня, накопление с привносимыми сточными водами солей и повышение их общей минерализации. Установлено, что при использовании более 20 лет земледельческие поля орошения проходят три этапа трансформации: адаптационный в течение 3-4 лет, устойчивого функционирования геоэкологической системы, утилизирующей промышленные сточные воды газоперерабатывающего комплекса продолжительностью 7-10 лет и критического состояния геоэкологической системы, связанного с утратой почвогрунтами очищающей способности и потребностью в оздоравливающих почвогрунты рекультивационных мероприятиях.

TRANSFORMATION STAGES OF CLEANING CAPACITY OF AGRICULTURAL IRRIGATION FIELDS WITH WASTEWATER FROM A GAS PROCESSING COMPLEX

Kruzhilin I.P.¹, Gamm T.A.²

¹Institute of Irrigated Agriculture,
400002, Volgograd, ul. Timiryazeva, 9

²Orenburg State University,
460018, Orenburg, prospert Pobedy, 13
E-mail: hammtam@mail.ru

The investigation of the dynamics of the cleaning capacity of agricultural irrigation fields of the wastewater from the gas processing complex showed that with irrigation at a rate of 480 m³/ha for 5 - 7 irrigations into the soil every year brings a 2.98 - 4.17 t / ha of pollutants, which remaining in the soil aeration zones contributed to alkalization and alkalinization of the soil and, as a result, reduced crop yields. In this case, calcium from the upper layers of the soil was carried into deeper layers, forming a new geochemical barrier. With a weak outflow of groundwater, their level rose, salt accumulated with wastewater, and their total mineralization increased. It has been established that when using agricultural irrigation fields for more than 20 years, they go through three stages: transformations, including adaptation within 3-4 years of stable functioning of the geo-ecosystem utilizing industrial wastewater from a gas processing complex lasting 7-10 years and a critical state of the geo-ecosystem associated with the loss of soil cleaning capacity by the soils and the need for remediation activities improving soil remediation measures.

Ключевые слова: земледельческие поля орошения, сточные воды газоперерабатывающей промышленности, засоление почв, уровень грунтовых вод, этапы трансформации очистительной способности

Key words: agricultural irrigation fields, wastewater from the gas processing industry, soil salinization, groundwater level, stages of transformation of purification capacity

Технологические процессы предприятий Оренбургской области связаны с использованием больших объемов воды. После выполнения целевого назначения она загрязняется и ее отводят в виде сточных вод, которые без предварительной очистки от загрязнителей не могут быть сброшены в водные объекты, что представляет серьезную проблему не только в России [1-5], но и за рубежом [6-9]. Чаще всего для очистки промышленных сточных вод используют земледельческие поля орошения (ЗПО) [10-12], где происходит доочистка сточных вод, а почвы деградируют и теряют очищающую способность [13-16], что послужило основанием для проведения наших исследований. Их целью было установление закономерностей динамики параметров характеристики геоэкологической системы под воздействием утилизации сточных вод для последующей разработки экологических ограничений по предотвращению деградации почвогрунтов, а при необходимости и их окультуривание.

Методика. Исследования проводили на ЗПО Оренбургского газоперерабатывающего комплекса площадью 1740 га, расположенных в непосредственной близости от предприятия в 1979-2015 гг. Сточные воды комплекса объемом более 2000000 м³ после собственных очистных сооружений биологической очистки проходят почвенную доочистку при орошении только кормовых сельскохозяйственных культур 63 дождевальными машинами (ДМ) «Фрегат». Почвы представлены черноземами южными малогумусными маломощными тяжелосуглинистыми. Грунтовые воды залегают на глубине 4-31 м.

Применяли методы моделирования водоносного горизонта в лизиметрах на лизиметрической площадке с исходным уровнем грунтовых вод 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 м с поливом сточной и смешанной водой, полевые методы исследований при орошении люцерны синегридной сточными водами с глубиной увлажнения слоя почвы 0,5 м на всех этапах формирования геоэкологической системы.

На лизиметрической площадке установлено 14 модифицированных нами лизиметров ГГИ-2000 круглого сечения площадью 1,0 м² с грунтами естественной структуры. Пункты наблюдения устанавливали на территории ДМ «Фрегат» № 7 при посеве люцерны синегибридной и на фоновых участках без сброса сточных вод, на лизиметрических площадках по схемам экспериментов с отбором почвенных образцов по ГОСТ 17.4.3.01 – 83 и ГОСТ 17.4.4.02-84 два раза в год – весной и осенью, уровень грунтовых вод на каждой ДМ «Фрегат» при периодических (через 10 дней) наблюдениях – по Д.М. Кац (1981 г.). Достигнутое при сбросе сточных вод химическое загрязнение почв оценивали по рекомендациям Н.И. Парфеновой (1981 г.), почвенную очистку сточных вод – по методике И.И. Скрынниковой (1977 г.).

Как в полевых исследованиях, так и на лизиметрической площадке, изменение характеристик почвы в период эксплуатации ЗПО контролировали по ГОСТ 17.5.3.04 – 83, степень загрязнения сточных вод – по СанПиН 2.1.7.573 – 96. Выбор контролируемых загрязняющих веществ определялся требованиями ГОСТ 17.1.3.07 – 82, степенью токсичности и уровнем концентрации загрязнителей. Наблюдение за уровнем грунтовых вод вели в соответствии с методическими рекомендациями «Организация и производство наблюдений за режимом уровня, напора и дебита подземных вод» (1983 г.). Исследования подземных вод проводили на 63 и одной фоновой режимных гидрогеологических скважинах измерением уровня и определением качества грунтовых вод. Определяемые в подземных водах загрязнители, требования к условиям консервации проб воды, фильтрованию и используемым материалам – общепринятые.

Фенологические наблюдения включали определение сроков наступления основных фаз развития растений, возделываемых на ЗПО. Биологическую урожайность учитывали метрочками в 3-кратной повторности по укосам. Данные исследований обработаны методом дисперсионного анализа по Доспехову Б.А. (1979 г.).

Результаты и обсуждение. ЗПО предназначены для доочистки сточных вод и возвращения их в окружающую среду. В емкость сезонного регулирования в зимний период аккумулируются сточные воды после биологических очистных сооружений, сточные воды Оренбургского газоперерабатывающего комплекса, промышленной базы и Каргалинской ТЭЦ, табл. 1.

Экологическую опасность представляют минеральные соли сточных вод, наличие в них тяжелых металлов и нефтепродуктов не превышает ПДК для вод хозяйственно-бытового назначения. Несмотря на срав-

Табл. 1. Химический состав сточных вод емкости сезонного регулирования, 1979-2014 гг.

Показатель	1979 г.	2001 г.	2005 г.	2010 г.	2014 г.
БПК ₅ , мг О ₂ /дм ³		19,32	11,42	18,35	23,70
ХПК, мг О ₂ /дм ³	50,2	41,00	51,28	60,93	68,90
Сульфаты, мг/дм ³	160	195,00	196,30	188,40	230,40
Хлориды, мг/дм ³	165	311,00	308,70	386,50	301,45

Табл. 2. Годовой баланс накопления солей (т/га) в почве при орошении сточными водами за первый этап, 1982-1987 гг.

Вариант	Приход со сточными водами	Вынос		Осталось в почво-грунте
		урожаем	фильтрационной водой	
ЗПО	4,046	0,234	0,00014	3,812
Лизиметры, УГВ: 1,0 м	4,046	0,332	0,00165	6,21
1,5 м	4,046	0,346	0,00072	5,53
2,0 м	4,046	0,318	0,00036	4,91
2,5 м	4,046	0,320	0,00015	4,73

нительно невысокую минерализацию, в среднем не более 1,22 г/л, общее содержание солей в сточных водах по сравнению с водами р. Урал, как и катионов натрия и магния, а также анионов сульфатов и хлоридов, было больше в 2-3 раза. В сточных водах содержатся органические вещества. Все это свидетельствует о том, что без предварительной доочистки они не могут быть сброшены в поверхностные или подземные воды, поэтому было решено использовать для этих целей ЗПО, на которых возделывали в основном кормовые культуры. Предельная норма орошения сточными водами, измеряемая максимально допустимой годовой подачей их на единицу площади, составляла 3500 м³/га. Следовательно, при соблюдении принятых ограничений по норме орошения годовое поступление солей на ЗПО со сточной водой не должно превышать 4,47 т/га.

При возделывании на ЗПО кормовых культур: люцерны синегибридной, суданской травы и др. нормы орошения в зависимости от допустимого снижения влажности активного слоя почвы и суммы осадков за вегетационный период изменялись от 2400 до 3360 м³/га. Их подавали на ЗПО при снижении влажности активного (0,6 м) слоя почвы до 70-75 % НВ (наименьшая влагоемкость) нормой по 480 м³/га за 5-7 поливов. С таким количеством сточных вод в почву ежегодно поступало 2,98-4,17 т/га солей, из которых часть использовали растения на формирование урожая, часть промывалась в более глубокие горизонты, за пределы активного слоя. Уже на первом этапе исследований было установлено, что большая часть из них оставалась в верхнем метровом слое почвы (табл. 2).

С урожаем выносилось менее 10% поступивших со сточной водой солей, еще меньшая их доля – с инфильтрационной водой. Поэтому при залегании уровня грунтовых вод ниже критической глубины в почво-грунтовом слое преимущественно ежегодно накапливалось в среднем 3,8 т/га солей сточных вод. При залегании уровня грунтовых вод выше критической глубины значительная часть солей с капиллярной каймой поступала в зону аэрации.

Оценка влияния длительного орошения сточными водами на химический состав исследуемых почв на третьем этапе исследования представлена в табл. 3. Более чем 20-летнее орошение сточными водами способствовало переводу этих почв по водной вытяжке из категории нейтральной в щелочную. В почве значительно повысилось содержание гумуса, особенно в пахотном слое, что связано прежде всего с орошени-

Табл. 3. Динамика агрохимической характеристики чернозема южного под влиянием длительного орошения сточными водами на третьем этапе исследования геозкосистемы

Глубина отбора образца, м	рН		Гумус, %		Емкость поглощения		Поглощенный натрий		Подвижный фосфор		Обменный калий	
					ммоль/100 г почвы				мг/кг почвы			
	1979 г.	1999 г.	1979 г.	1999 г.	1979 г.	1999 г.	1979 г.	1999 г.	1979 г.	1999 г.	1979 г.	1999 г.
0-0,20	7,2	8,3	4,8	5,9	28,0	32,8	0,38	2,1	16,5	25,0	260	370
0,20-0,45	7,6	8,5	3,9	5,2	23,2	31,4	0,87	2,1	6,5	160	100	280
0,46-1,15	7,2	8,7	2,7	3,2	-	30,2	1,90	2,3	-	-		

ем, создавшим благоприятные условия для активизации микробиологической деятельности, внесением органических и минеральных удобрений и получением высоких урожаев сельскохозяйственных культур, оставляющих после уборки существенное количество пожнивной и корневой массы.

Емкость поглощения почвы и количество натрия в почвенном поглощающем комплексе повысились более чем на 10%, увеличилось содержание подвижного фосфора и обменного калия. Концентрация тяжелых металлов в пахотном слое почвы по Cu составила 4,17, Zn – 1,7, Co – 4,2, Mn – 4,59, Ni – 2,5, Pb – 2,3, Cd – 2,0 и Cr – 2,46. Наряду с накоплением тяжелых металлов в почве ЗПО снизились фильтрационные показатели, отмечены ошелачивание и слитизация.

Длительное орошение сточными водами значительно влияло на гидрогеологические характеристики ЗПО и прилегающей к ним территории. При слабом оттоке грунтовых вод происходил подъем их уровня, накопление с привносимыми сточными водами солей, повышение их общей минерализации. По данным мониторинга, это объясняется частичной потерей при длительной эксплуатации ЗПО утилизирующей способности почвы загрязняющих сточные воды веществ. При этом в почвенном профиле отмечены разрушение существующего карбонатного горизонта и формирование новых солевых барьеров в пахотном слое 0-0,3 м и на границе промачивания почвы поливами на глубине 0,5-0,6 м. В этих геохимических барьерах и сосредоточивались в основном тяжелые металлы.

Новый карбонатный барьер на почвах ЗПО формировался на глубине 0,6-0,8 м. Наряду с миграцией солей в почве, наблюдали поступление загрязнителей сточных вод в грунтовые и поверхностные воды реки, сезонную цикличность их уровня, связанную со сбросом сточных вод и выпадением атмосферных осадков.

Вследствие частичного потребления загрязнителей сточных вод растительностью, накопления их в геохимических барьерах, а также собственной почве буферности, в том числе и к натрий-иону, в первые годы функционирования ЗПО все стрессовые ситуации, связанные с утилизацией сточных вод газоперерабатывающего комплекса, нивелировались саморегулирующей способностью геозкосистемы. Однако с увеличением срока службы ЗПО, по мере накопления загрязнителей и негативного воздействия их на геозкосистему, устойчивость ее функционирования нарушалась. Это проявлялось в подъеме уровня грунтовых вод, уменьшении зоны аэрации почвогрунтов до размеров, затрудняющих или не обеспечивающих возложенных на ЗПО функций, других признаках природной и экологической деградации геозкосистемы.

Анализ полученных в результате мониторинга данных позволил установить три этапа трансформации геозкосистемы ЗПО газоперерабатывающего комплекса. Первый – адаптационный, зависящий в основном от мощности зоны аэрации, нормы нагрузки и степени загрязнения сточных вод (3-4 года). В этот период идет насыщение почвенно-грунтового профиля инфильтрационными водами и загрязнителями сточных вод с перемещением карбонатного горизонта за пределы глубины промачивания почвы и формированием двух новых геохимических барьеров. Геоэкологическая составляющая природно-технической системы функционировала устойчиво, продуктивность сельскохозяйственных культур благодаря орошению и удобрениям существенно повысилась, растительная продукция отвечала экологическим требованиям.

Второй этап – устойчивое функционирование геозкосистемы, утилизирующей промышленные сточные воды (7-10 лет). Возникающие под воздействием залповых выбросов на ЗПО сточных вод стрессовые

Табл. 4. Динамика показателей характеристики почв геозкосистемы на четвертом этапе (среднее по ЗПО, 1982-2015 гг.)

Показатель	рН	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ⁺
	мг/кг						
Фон, без орошения	7,5	69,90	742,90	41,00	64,50	32,70	35,60
Среднее по ЗПО за 1982-1984 гг.	8,2	84,00	279,70	51,30	56,10	26,90	42,3
Среднее по ЗПО, 2014 г. (осень)	8,3	95,30	441,30	89,20	104,00	25,40	57,00
Среднее по ЗПО, 2015 г. (весна)	8,1	78,50	551,50	38,00	81,00	23,90	94,90

ситуации носили циклический характер и не выходили за пределы экологической емкости геоэкологической системы, так как полностью гасились вновь сформировавшимися в почвогрунтовой профиле геохимическими барьерами. С этим периодом связано пополнение грунтовых вод фильтрационными и в основном очищенными сточными водами. В связи с интенсивным разрушением фильтрационными водами карбонатного барьера часть ионов кальция и магния вместе с ними попадала в грунтовые воды, уровень которых поднимался тем заметнее, чем больше сокращалась зона аэрации.

Наиболее существенные изменения качественного состояния геоэкологической системы связаны с третьим этапом ее развития, обусловленным значительной утратой почвогрунтами очищающей способности, связанной с насыщением их загрязнителями и уменьшением зоны аэрации в части реабилитирующей транзитной через почвогрунты сточными водами ЗПО в грунтовой поток. Поэтому была проведена рекультивация земель с использованием серной кислоты и кальцийсодержащих веществ для улучшения свойств почв, и геоэкологическая система вступила в 4 этап своего развития (табл. 4).

Данные многолетнего мониторинга состояния геоэкологической системы свидетельствуют о необходимости мероприятий по восстановлению утраченной ЗПО способности к очистке промышленных сточных вод и улучшению качества сбрасываемых сточных вод. На участках с высоким уровнем грунтовых вод требуется их понижение вплоть до строительства дренажа. Чтобы уменьшить негативное влияние минерализованных грунтовых вод в местах расположения их выше критической глубины на почвах зоны аэрации следует снизить норму орошения сельскохозяйственных культур сточными водами.

Литература.

1. Максименко В.П., Стрельбицкая Е.Б., Зайцев С.А. Об инженерно-техническом решении экологических проблем водопользования в сельском хозяйстве // *Экология и промышленность России*. – 2015. – Т. 19. – № 1. – С. 4–7.
2. Кирейчева Л.В., Юрченко И.Ф., Яшин В.М. Научные основы создания и управления мелиоративными системами в России / Под ред. Л.В. Кирейчевой. – М.: ВНИИ агрохимии, 2017. – 296 с.
3. Инновационные методы очистки и вторичного использования сточных вод (I). [Электронный ресурс] / Колесник [и др.] // *Актуальные проблемы современной науки*. – 2016. – №1 (86). – С. 212–217. — Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/411482/>
4. Исследование работы установок для очистки нефтесодержащих и промышленных сточных вод. [Электронный ресурс] / Максимов, Васильев // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2014. – №4 – С. 21–32. — Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/441189>.
5. Мирхасилова З.К., Тиркашева М.Б., Нигматов И. Комплекс мероприятий по сокращению сброса загрязненных вод в реки [Текст] // *Инновационные технологии в сельском хозяйстве: материалы Международ. науч. конф. (г. Москва, июнь 2015 г.)*. – М.: Буки-Веди, 2015. – С. 19–22. – URL <https://moluch.ru/conf/agr/archive/127/7097/>.
6. The impact of replacing groundwater by treated sewage effluent on the irrigation requirements of *Al Ghaf* (*Prosopis cineraria*) and *Al Sidr* (*Ziziphus spina-christi*) forests in the hyper-arid deserts of Abu Dhabi/Wafa Al-Yamani, Steve Green, Rommel Pangilinan, Steve Dixon, Shabbir A. Shahid, Peter Kemp, Brent Clothier. // *Agricultural Water Management*: – 2019. – № 214 – P. 28–37/
7. The Influence of Nutrients on Turfgrass Response to Treated Wastewater Application, Under Several Saline Conditions and Irrigation Regimes *Environmental Processes*, J. Beltrão, P. J. Correia, M. Costa, P. Gamito, R. Santos, J. Seita. – //Springer Science and Business Media LLC. *Environmental Processes. Environmental Processes*. – 2014. – Vol. 1, – P. 105–113. doi:10.1007/s40710-014-0010-1.
8. Use of brackish water and its impacts on soil fertility and wheat crop in Kachho, Sindh, Pakistan. By: Noor Hussain Chandio, Gohar Ali Mahar, Naveed Noor /*Int. J. Biosci.* // *International Journal of Biosciences | IJB | ISSN: 2220-6655 (Print), 2222-5234 (Online) http://www.innspub.net*. 2018. – Vol. 13. – N. 5. – P. 70–76, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/13.5.70-76>.
9. Effectiveness of inorganic and organic mulching for soil salinity and sodicity control in a grapevine orchard drip-irrigated with moderately saline waters Ramón Aragüés*, Eva Teresa Medina and Ignacio Clavería. // *Spanish Journal of Agricultural Research*. – 2014. — № 12(2). – P. 501–508.
10. Гамм Т.А. Научные основы рациональной организации природно-технической системы. – Екатеринбург: УрОПАН, 2003. – 486 с.
11. Сетко Н.П., Боев В.М. Медицина труда и экология человека в газовой промышленности: монография. – М.: Медицина, 2009. – 420 с.
12. Опустынивание и комплексная мелиорация агроландшафтов засушливой зоны / К.Н. Кулик, Э.Б. Габуничина, И.П. Кружilin [и др.]. – Волгоград: ВНИАЛМИ, 2007. – 85 с.
13. Драган Н.А. Динамика почвенных процессов при орошении агроландшафтов в равнинном Крыму // *Геополитика и экогеодинамика регионов: сборник научных трудов Таврического национального университета имени В.И. Вернадского*. Вып. 2. – Симферополь: ТНУ им. В.И. Вернадского, 2005. – С. 33–44.
14. Кружilin И.П., Казакова Л.А. Комплексная мелиорация солонцов на орошаемых землях Волго-донского междуречья // *Почвоведение*. – 2003. – N 5. – С. 623–629.
15. Кружilin И.П., Казакова Л.А. Толерантность основных культур кормовых севооборотов к засолению // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. – 2006. – N 6. – С. 37–39.
16. Минкина Т. М., Ендовицкий А. П., Калинин В. П., Федоров В.. Карбонатно-кальциевое равновесие в системе вода-почва — Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2012. – 375 с.

Поступила в редакцию 17.12.19
После доработки 10.01.20
Принята к публикации 27.01.20