



БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Издается с января 2001 г.

11(167)
2014

Редакционный совет:

БАЛЫХИН Г. А., д.э.н.
ГРАЧЕВ В. А., чл.-корр. РАН,
д.т.н., проф.
ГРИГОРЬЕВ С. Н., д.т.н., проф.
ДУРНЕВ Р. А., д.т.н., доц.
ЗАЛИХАНОВ М. Ч., акад. РАН,
д.т.н., проф. (председатель)
КЛИМКИН В. И., к.т.н.
КОТЕЛЬНИКОВ В. С., д.т.н.,
проф.
РОДИН В. Е., д.т.н., проф.
СОКОЛОВ Э. М., д.т.н., проф.
ТЕТЕРИН И. М., д.т.н.
УШАКОВ И. Б., акад. РАН,
д.м.н., проф.
ФЕДОРОВ М. П., акад. РАН,
д.т.н., проф.
ЧЕРЕШНЕВ В. А., акад. РАН, д.т.н.
АНТОНОВ Б. И.
(директор издательства)

Главный редактор

РУСАК О. Н., д.т.н., проф.

Зам. главного редактора
ПОЧТАРЕВА А. В.

Ответственный секретарь

ПРОНИН И. С., д.ф.-м.н., проф.

Редакционная коллегия:

БЕЛИНСКИЙ С. О., к.т.н., доц.
ВАСИЛЬЕВ А. В., д.т.н., проф.
ИВАНОВ Н. И., д.т.н., проф.
КАЛЕДИНА Н. О., д.т.н., проф.
КАЧУРИН Н. М., д.т.н., проф.
КЛЕЙМЕНОВ А. В., д.т.н.
КОСОРУКОВ О. А., д.т.н., проф.
КРАСНОГОРСКАЯ Н. Н., д.т.н.,
проф.
КСЕНОФОНТОВ Б. С., д.т.н.,
проф.
КУКУШКИН Ю. А., д.т.н., проф.
ЛУЩИ С., проф. (Италия)
МАЛАЯН К. Р., к.т.н., проф.
МАРТЫНЮК В. Ф., д.т.н., проф.
МАТЮШИН А. В., д.т.н.
МИНЬКО В. М., д.т.н., проф.
МИРМОВИЧ Э. Г., к.ф.-м.н., доц.
ПЕТРОВ С. В., к.ю.н., с.н.с.
СИМАНКИН А. Ф., к.т.н., доц.
ТОПОЛЬСКИЙ Н. Г., д.т.н., проф.
ФИЛИН А. Э., д.т.н., доц.
ФРИДЛАНД С. В., д.т.н., проф.
ЦЯН МИНЦЗЮНЬ, проф.
(Китай)
ШВАРЦБУРГ Л. Э., д.т.н., проф.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РЕСПУБЛИКЕ БАШКОРТОСТАН

Красногорская Н. Н., Нафикова Э. В., Белозерова Е. А., Дубовик И. Е., Шарипова М. Ю. Оценка геоэкологического риска истощения поименно-руслового комплекса с применением методов геоинформационного моделирования 3

Цвиленева Н. Ю., Эйдемиллер Ю. Н., Швец А. С., Яханов А. П. Анализ техногенного риска при функционировании предприятия нефтепереработки на основе ГОСТ Р 54144—2010 Менеджмент рисков 8

Вдовина И. В., Смирнова Т. П. Доочистка сточных вод горно-обогатительного комбината с использованием элементов природно-техногенных ландшафтов 17

Красногорская Н. Н., Зельдова А. И., Мусина С. А., Малкова М. А., Платонова И. М. Математическое описание процесса флокуляции металлсодержащих сточных вод гальванического производства с помощью полного факторного эксперимента 22

Красногорская Н. Н., Кусова И. В., Мусина С. А. Усовершенствование технологии очистки сточных вод гальванического производства 29

Хатмуллина Р. М., Сафарова В. И., Сафаров А. М. Эмиссия полициклических ароматических углеводородов в окружающую среду 34

Рахман Джамиль А. К. М., Кантор Л. И., Дружинская Е. В., Кантор Е. А. Мониторинг содержания бенз(а)пирена в 2001—2012 годах в створах реки Уфы 38

Смирнова Т. П., Михеева Т. Н., Ступин А. П., Магасумова А. Т., Шайдулина Г. Ф., Сафарова В. И., Кузьмин Р. С. Исследование хронического токсического действия модельных растворов мышьяка с использованием объектов фито- и зоопланктона 43

Шарипова М. Ю., Дубовик И. Е., Красногорская Н. Н., Нафикова Э. В., Белозерова Е. А. Изменение таксономической структуры сообществ водорослей экотонов при переходе от водной к наземной среде обитания 49

Красногорская Н. Н., Нафикова Э. В., Белозерова Е. А. Восстановление пропущенных геоэкологических данных с помощью элементов искусственного интеллекта (на примере характеристик водосборного бассейна реки Белая) 54

ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ

Унковская А. В. Оценка частоты аварийной разгерметизации магистральных нефтепроводов (Часть 1) 60

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, и включен в систему Российского индекса научного цитирования.



The journal published since
January 2001

Editorial board

BALYKHIN G. A., Dr. Sci. (Econ.)
GRACHEV V. A., Cor.-Mem. RAS,
Dr. Sci. (Tech.)
GRIGORYEV S. N., Dr. Sci. (Tech.)
DURNEV R.A., Dr. Sci. (Tech.)
ZALIKHANOV M. Ch.,
Acad. RAS, Dr. Sci. (Tech.)
KLIMKIN V. I., Cand. Sci. (Tech.)
KOTELNIKOV V. S., Dr. Sci. (Tech.)
RODIN V. E., Dr. Sci. (Tech.)
SOKOLOV E. M., Dr. Sci. (Tech.)
TETERIN I. M., Dr. Sci. (Tech.)
USHAKOV I. B., Acad. RAS,
Dr. Sci. (Med.)
FEDOROV M. P., Acad. RAS,
Dr. Sci. (Tech.)
CHERESHNEV V. A., Acad. RAS,
Dr. Sci. (Tech.)
ANTONOV B. I.

Editor-in-chief

RUSAK O. N., Dr. Sci. (Tech.)

Deputy editor-in-chief

POCHTAREVA A. V.

Responsible secretary

PRONIN I. S.,
Dr. Sci. (Phys.-Math.)

Editorial staff

BELINSKIY S. O.,
Cand. Sci. (Tech.)
VASILYEV A. V., Dr. Sci. (Tech.)
IVANOV N. I., Dr. Sci. (Tech.)
KALEDINA N. O., Dr. Sci. (Tech.)
KACHURIN N. M., Dr. Sci. (Tech.)
KLEYMENOV A. V., Dr. Sci. (Tech.)
KOSORUKOV O. A., Dr. Sci. (Tech.)
KRASNOGORSKAYA N. N.,
Dr. Sci. (Tech.)
KSENOFONTOV B. S.,
Dr. Sci. (Tech.)
KUKUSHKIN Yu. A.,
Dr. Sci. (Tech.)
LUZZI S. (Italy), prof.
MALAYAN K. R., Cand. Sci. (Tech.)
MARTYNYUK V. Ph.,
Dr. Sci. (Tech.)
MATYUSHIN A. V., Dr. Sci. (Tech.)
MINKO V. M., Dr. Sci. (Tech.)
MIRMOVICH E. G.,
Cand. Sci. (Phys.-Math.)
PETROV S. V., Cand. Sci. (Yurid.)
SIMANKIN A. F., Cand. Sci. (Tech.)
TOPOLSKIY N. G., Dr. Sci. (Tech.)
FILIN A. E., Dr. Sci. (Tech.)
FRIDLAND S. V., Dr. Sci. (Tech.)
JIANG MINGJUN (China), prof.
SHVARTSBERG L. E.,
Dr. Sci. (Tech.)

11(167)
2014

CONTENTS

ENSURING ECOLOGICAL SAFETY IN BASHKORTOSTAN REPUBLIC

- Krasnogorskaya N. N., Nafikova E. V., Belozerova E. A., Dubovik I. E., Sharipova M. J.**
Geoecological Risk Assessment of Floodplain-Channel Complex Depletion Using The
Geoinformation System Modeling Methods 3
- Tsvileneva N. Yu., Eydemiller Yu. N., Shvets A. S., Yakhanov A. P.** Risk Analysis of Oil
Enterprise on the Base of GOST R 54144—2010 Risk Management 8
- Vdovina I. V., Smirnova T. P.** Tertiary Treatment Mountain-Concentrating Facility Sewage with
Elements of Technologically-Modified Natural Landscapes 17
- Krasnogorskaja N. N., Zeldova A. I., Musina S. A., Malkova M. A., Platonova I. M.**
Mathematical Description of the Flocculation Process of Metal Containing Wastewater using Full
Factorial Experiment 22
- Krasnogorskaya N. N., Kusova I. V., Musina S. A.** Improvement Wastewater Treatment
Technology of Galvanic Production 29
- Khatmullina R. M., Safarova V. I., Safarov A. M.** Emission of the Polycyclic Aromatic
Hydrocarbons into the Environment 34
- Rahman Jamil A. K. M., Kantor L. I., Druzhinskaya E. V., Kantor E. A.** Monitoring of
Benz(a)pyrene in 2001—2012 at Cross-Sections Situated on the Ufa River 38
- Smirnova T. P., Mikheyeva T. N., Stupin A. P., Magasumova A. T., Shaydulina G. F.,
Safarova V. I., Kuzmin R. S.** The Research of Chronic Toxic Effect of Model Arsenic Solution
with Using Objects Phyto- And Zooplankton 43
- Sharipova M. J., Dubovik I. E., Krasnogorskaya N. N., Nafikova E. V., Belozerova E. A.**
Change of Taxonomical Structure of Algae Communities of Ecotones upon Transition from
Aquatic to Terrestrial Habitat 49
- Krasnogorskaya N. N., Nafikova E. V., Belozerova E. A.** Missing Geoecological Data Recovery
using the Elements of Artificial Intelligence (by the Example of the Catchment Area
Characteristics of the River Belaya). 54

SITUATION OF EMERGENCY

- Unkovskaya A. V.** Assessment of Leak Frequency of Cross-Country Oil Pipelines (Part 1). 60

Information about the journal is available online at: <http://novtex.ru/bjd>, e-mail: bjd@novtex.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РЕСПУБЛИКЕ БАШКОРТОСТАН ENSURING ECOLOGICAL SAFETY IN BASHKORTOSTAN REPUBLIC

УДК 502.56/.568

Н. Н. Красногорская, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой,
Э. В. Нафикова, канд. геогр. наук, доц., **Е. А. Белозерова**, асп.,
elena.belozerova.ufa@gmail.com, Уфимский государственный авиационный технический университет,
И. Е. Дубовик, д-р биол. наук, проф., **М. Ю. Шарипова**, д-р биол. наук, доц.,
Башкирский государственный университет, Уфа

Оценка геоэкологического риска истощения пойменно-руслового комплекса с применением методов геоинформационного моделирования

Предложена методика комплексной оценки геоэкологического риска пойменно-руслового комплекса, включающая в себя оценку риска истощения пойм по видовому составу растительности и риска истощения пойм по эколого-гидрологическому состоянию. Методика апробирована для пойменно-руслового комплекса реки Белая и ее притоков. При оценке риска по видовому составу разработаны геоинформационные карты растительности и лесистости пойм реки Белая. Показателем устойчивости поймы к риску истощения выбрана степень залесенности пойменных территорий. Расчет риска истощения пойм по эколого-гидрологическому состоянию производился с учетом: площади пойменных областей, данных о водосборе подземных и поверхностных вод, "запечатанности" территорий, среднемноголетних расходов годового стока. По результатам комплексной оценки геоэкологического риска истощения пойменно-руслового комплекса выявлены наиболее уязвимые участки. Пойма реки Ашкадар была классифицирована как подверженная риску деградации.

Ключевые слова: пойменно-русловой комплекс, истощение, растительность пойм, пойменные леса, геоэкологическая оценка, геоинформационные системы

На протяжении тысячелетий поймы являлись местом образования поселений и ведения сельского хозяйства, для многих современных ландшафтов эти функции по-прежнему остаются основными [1]. В настоящее время на пойменных территориях сконцентрировано большое количество населенных пунктов, объектов сельского хозяйства, промышленных предприятий, коммуникаций, рекреационных зон, поэтому поддержание устойчивого состояния пойменно-русловых комплексов необходимо для обеспечения безопасности населения и территории.

Пойменно-русловые комплексы обладают всеми признаками природных комплексов — они территориально и генетически едины, процессы, в них протекающие, взаимосвязаны, географические объекты или комплексы низшего ранга (подсистемы), возникающие в результате этих процессов, влияют друг на друга [2].

Актуальность исследования речных пойм обусловлена необходимостью оптимизировать ис-

пользование природных ресурсов, снизить последствия антропогенной нагрузки на окружающую среду. Часто высокая экологическая напряженность возникает из-за недостаточного знания и, соответственно, недоучета географических закономерностей распространения и форм проявления природных процессов [3].

При решении экологических проблем рационального природопользования пойменно-русловых комплексов возникает целый ряд вопросов методического и методологического характера: неопределенность критериев для оценки экологического состояния пойм и водных объектов; поливариантность взаимосвязей количественных и качественных характеристик пойменно-руслового комплекса из-за региональных природных, антропогенных и климатических особенностей территории.

Река Белая — главная водная артерия Республики Башкортостан и одновременно пример водного объекта, подвергающегося техногенному влиянию в течение длительного времени. В этой



Таблица 1

Соотношения площадей видового состава растительности и лесистости к площади исследуемых пойменно-руслowych комплексов, %

Растительность	Река							
	Белая	Быстрый Танып	Сим	Инзер	Дема	Ашкадар	Нугуш	Уфа
Темнохвойные широколиственные леса	1,10	16,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Пойменные черемухо-ольховые леса	21,20	0,05	58,22	44,03	1,81	0,00	0,00	31,51
Широколиственные липово-кленово-дубовые леса	1,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	88,61	0,00
Широколиственные мезофитные леса	7,79	8,52	37,28	56,06	0,00	0,00	0,00	40,96
Южнотаежные сосновые леса с липой	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Луга и пашни на месте пойменных лесов	26,18	0,00	0,00	0,00	17,89	0,00	0,00	1,26
Луговые степи и остепененные леса	2,46	0,00	0,00	0,00	28,11	81,36	0,00	0,00
Пашни сенокосы и пастбища на месте пойменных лесов	3,02	53,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Пашни, сенокосы и пастбища	17,67	18,74	2,15	0,00	0,00	0,00	0,00	27,17
Пашни, луговые степи и остепененные луга	12,26	0,00	0,00	0,00	52,27	14,77	11,47	0,00
Растительность заволжско-казахстанской степи	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,97	0,00	0,00
Дубово остепененные леса	0,18	0,00	0,00	0,00	15,79	0,00	0,00	0,00

связи актуальной становится проблема истощения ее пойменно-руслowego комплекса.

Целью данного исследования является оценка риска истощения пойменно-руслowego комплекса реки Белая с применением методов геоинформационного моделирования для выявления участков пойм, наиболее подверженных деградации.

Ввиду сложности объекта исследования предлагается провести комплексную оценку риска, которая включает в себя: оценку риска истощения пойм по видовому составу растительности и расчет риска истощения пойм по эколого-гидрологическому состоянию.

Оценка риска истощения пойм по видовому составу растительности

При расчете риска истощения пойменно-руслowych комплексов по состоянию пойменных лесов в работе предложено учитывать особенности использования территории: распаханность, лесистость, "запечатанность" территории и т. д.

На основании пространственных данных геоинформационных систем (ГИС) растительности Республики Башкортостан разработаны информационные карты по видовому составу растительности и лесистости пойменных территорий реки Белая. Определены соотношения площадей видового состава пойменных лесов (дубово-остепененные леса, пойменные черемухо-ольховые леса, темнохвойные широколиственные леса и т. д.) к площади пойм исследуемых рек (табл. 1).

Пример районирования исследуемых пойменных областей по видовому составу растительности представлен на рисунке.

Ряд исследователей [4–6] относят пойменные леса к высшим классам защищенности территории, особо выделяя их берегозащитную, почвоза-

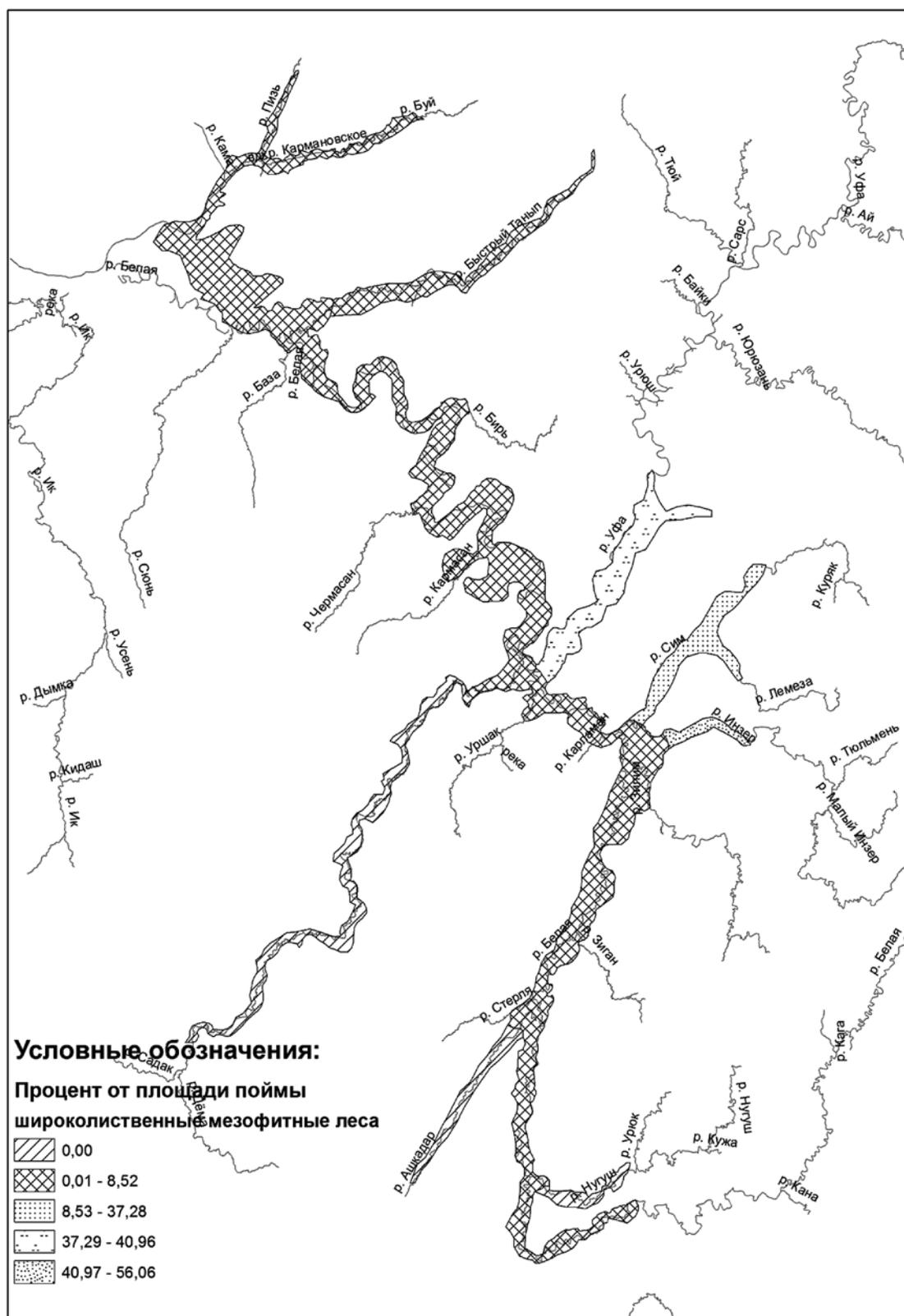
щитную, водоохранную, кольматирующую¹ и руслообразующую роль. Уничтожение в прошлом лесов в долинах и на водосборах рек повлекло за собой усиление эрозионных процессов в самой пойме, проявляющихся в виде размыва берегов, поверхности поймы и конусов выноса.

Защитная роль пойменных лесов состоит в укреплении почвогрунта корневой системой. Наземная часть деревьев и кустарников, замедляя водный поток, снижает его эрозионную силу. Тогда как на необлесенных участках происходит размывание берега. Прирусловые леса и подлесок способствуют аккумуляции твердого стока, транспортируемого водными потоками, предотвращая его смыв, задерживают в половодье наносы, дернину и фрагменты растительности, предотвращая засорение и заиливание потока и пойменных почв [7]. Преобладание лесных насаждений говорит об устойчивости поймы к риску деградаций, тогда как пашни, сенокосы, степи указывают на высокий потенциальный риск истощения пойм.

Из приведенной табл. 1 видно, что наиболее устойчивыми к истощению по видовому составу растительности являются поймы рек Сим, Инзер и Уфа, где преобладают пойменные черемухо-ольховые и широколиственные мезофитные леса. К этой группе относится и пойма реки Нугуш, площадь которой на 88,61 % покрыта широколиственными липово-кленово-дубовыми лесами.

Наиболее подвержены риску истощения пойменные области реки Быстрый Танып и реки Белая в среднем течении, где около половины площадей пойм включают земли под пашни и сенокосы. Около 80 % площади пойменной области

¹ Кольматаж — аккумуляция твердого стока, транспортируемого водным потоком.



Карта-схема результата районирования территории пойменных областей, занятых широколиственными мезофитными лесами



реки Ашкадар занимают луговые степи и остепененные леса, что говорит о ее повышенной степени подверженности геоэкологическому риску истощения. В пойменных областях реки Дема луга, пашни и луговые степи в совокупности занимают около 80 %.

Оценивая истощение пойменно-руслового комплекса по видовому составу растительности сложно дать количественную интерпретацию потенциальному риску, можно говорить лишь о его относительных величинах.

Расчет риска истощения пойм по эколого-гидрологическому состоянию

В основу расчета геоэкологического риска положен подход к определению риска длительного (хронического) воздействия: загрязнение вод, истощение водных ресурсов, деградация речной сети (А. В. Киселев, К. Б. Фридман) [8]. Величина риска и коэффициент истощения пойм вычислялись по формулам [9]:

$$Risk_{ист} = 1 - \exp\{\ln(0,84)K_{ист}K_{п}\}, \quad (1)$$

где $K_{п}$ — поправочный коэффициент в зависимости от коэффициента истощения [8]; $K_{ист}$ — коэффициент истощения, вычисляется по формуле:

$$K_{ист} = \frac{V_{пов} + V_{под}}{Q_{год.ст} S_{поймы} K_{исп}}, \quad (2)$$

где $V_{пов}$ и $V_{под}$ — водоотбор поверхностных и подземных вод, тыс. м³/км²; $Q_{год.ст}$ — среднегодовое расходом годового стока, м³/с; $S_{поймы}$ — пло-

щадь поймы реки, км²; $K_{исп}$ — поправочный коэффициент в зависимости от вида использования территории.

По имеющимся данным ежедневных гидрологических характеристик реки Белая в поймах рек: Белая, Быстрый Танып, Инзер, Уфа, Дема, Сим, Ашкадар, Нугуш выполнялся расчет среднегогодового стока за период 1990—2007 гг. Период исследования обусловлен полнотой исходной информации. На основании расчетов среднегогодового стока реки Белая и информации БашУГМС [10] о "действующих площадях водосборов" определены среднегогодовые значения коэффициента истощения пойм $K_{ист}$. Величины риска истощения пойменно-русловых комплексов $Risk_{ист}$ сведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что пойменные области рек Ашкадар, Нугуш и Инзер наиболее подвержены риску истощения по эколого-гидрологическому состоянию, в то время как поймы рек Белая, Уфа и Сим устойчивы к истощению.

Проведенная оценка геоэкологического риска пойменно-руслового комплекса показала, что отдельные участки пойм подвержены различным видам риска, и только комплексный подход способен дать полную картину потенциальной опасности.

При сопоставлении применяемых методик оценки истощения пойменных областей (табл. 3) пойма реки Ашкадар была классифицирована как подверженная риску деградации, минимальный риск характерен для пойм рек Уфа и Сим.

Таким образом, применение методов геоинформационного моделирования для оценки геоэкологического риска истощения пойменно-ру-

Таблица 2

Расчитанные коэффициенты и величины риска истощения пойменно-русловых комплексов реки Белая

Показатель	Река							
	Белая	Быстрый Танып	Инзер	Уфа	Дема	Сим	Ашкадар	Нугуш
$K_{ист}, 10^{-3}$	0,035	0,267	0,805	0,0133	0,437	0,085	5,963	4,195
$R_{ист}, 10^{-6}$	6,163	45,487	130,952	2,321	73,428	14,773	646,428	518,802

Таблица 3

Комплексная оценка истощения пойменно-русловых комплексов реки Белая

Показатель	Река							
	Белая	Быстрый Танып	Инзер	Уфа	Дема	Сим	Ашкадар	Нугуш
Риск истощения пойм по видовому составу растительности	—	—	+	+	—	+	—	+
Риск истощения пойм по эколого-гидрологическому состоянию	+	+	—	+	+	+	—	—

слового комплекса позволили выявить наиболее подверженные риску деградации участки пойменных областей, нуждающиеся в применении природоохранных мер.

Список литературы

1. Gerard C. Nanson, Jacky C. Croke Emerging issues in flood plain research. The Structure, Function and Management Implications of Fluvial Systems (Proceeding of an international symposium held at Alice Springs, Australia, September 2002). IAHS-AISH Publ. — P. 271—278.
2. Пашканг К. В. Комплексная физическая география / К. В. Пашканг. — Смоленск: Универсум, 2000. — 230 с.
3. Чернов А. В. Географический анализ пойменно-русловых комплексов Северной Евразии: методика и результаты // Географический вестник: научный журнал Пермского университета. URL: http://www.geo-vestnik.psu.ru/files/vest/88_

- geograficeskiq_analiz_poqmenno-ruslovyh_kompleksov. pdf (дата обращения: 05.06.2014).
4. Денисов А. К. Защитно-водоохранная роль прирусловых лесов и принципы хозяйства в них. — М.: Гослесбумиздат, 1963. — 140 с.
 5. Николаенко В. Т. Лес и защита водоемов от загрязнения. — М.: Лесная промышленность, 1980. — 264 с.
 6. Рубцов М. В. Защитно-водоохранные леса. — М.: Лесная промышленность, 1972. — 120 с.
 7. Шаталов В. Г., Трещевский И. В., Якимов И. В. Пойменные леса. — М.: Лесная промышленность, 1984. — 160 с.
 8. Щербинина С. В. Эколого-гидрологическая оценка состояния речных водосборов для уточнения комплекса водоохранных мероприятий (на примере Воронежской области): дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27. Щербинина Светлана Васильевна. — Воронеж, 2006. — 154 с.
 9. Нафикова Э. В. Оценка и прогнозирование геэкологически опасных природно-техногенных процессов на водосборе реки: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36. Нафикова Эльвира Валериковна. — Уфа, 2013. — 230 с.
 10. Гидрологические ежегодники. 1936—2010. — Т. 4. — Вып. 5—7.

N. N. Krasnogorskaya, Professor, Head of Chair, E. V. Nafikova, Associate Professor, E. V. Belozerova, Postgraduate Student, E-mail: elena.belozerova.ufa@gmail.com, Ufa State Aviation Technical University, I. E. Dubovik, Professor, M. J. Sharipova, Associate Professor, Bashkir State University, Ufa

Geocological Risk Assessment of Floodplain-channel Complex Depletion Using the Geoinformation System Modeling Methods

The paper proposes a comprehensive approach to geocological risk assessment of the river Belaya floodplain-channel complex, which includes risk assessment of the floodplain vegetation depletion of species composition, and the risk of the floodplain depletion calculation by eco-hydrological state. To estimate the risk by species composition GIS maps of the river Belaya floodplain vegetation were designed. The forest cover degree was selected as indicator of the floodplain sustainability to the risk of depletion. The risk of the floodplain depletion by eco-hydrological state was calculated using the parameters: floodplain area, data on groundwater and surface water catchment, artificial "sealed," territories, the average long-term annual flow. According to results of a comprehensive assessment the river Ashkadar floodplain was classified as floodplain with a high probability of degradation.

Keywords: floodplain-channel complex, depletion, floodplain vegetation, riparian forest, geocological assessment, geoinformation system

References

1. Gerard C. Nanson, Jacky C. Croke Emerging issues in flood plain research. The Structure, Function and Management Implications of Fluvial Systems (Proceeding of an international symposium held at Alice Springs, Australia, September 2002). IAHS-AISH Publ. P. 271—278.
2. Pashkang K. V. Kompleksnaja fizicheskaja geografija / K. V. Pashkang. Smolensk: Universum, 2000. 230 p.
3. Chernov A. V. Geograficheskij analiz pojmenno-ruslovyh kompleksov Severnoj Evrazii: metodika i rezul'taty. *Geograficheskij vestnik: nauchnyj zhurnal Permskogo universiteta*. URL: http://www.geo-vestnik.psu.ru/files/vest/88_geograficeskiq_analiz_poqmenno-ruslovyh_kompleksov.pdf (access date: 05.06.2014).
4. Denisov A. K. Zashhitno-vodoohrannaja rol' priruslovyh lesov i principy hozjajstva v nih. M.: Goslesbumizdat, 1963. 140 p.

5. Nikolaenko V. T. Les i zashhita vodoemov ot zagraznenija. M.: Lesnaja promyshlennost', 1980. 264 p.
6. Rubcov M. V. Zashhitno-vodoohrannye lesa. M.: Lesnaja promyshlennost', 1972. 120 p.
7. Shatalov V. G., Treshhevskij I. V., Jakimov I. V. Pojmennye lesa. M.: Lesnaja promyshlennost', 1984. 160 p.
8. Sherbinina S. V. Ekologo-gidrologicheskaja ocenka sostojanija rechnyh vodosborov dlja utochnenija kompleksa vodoohrannyh meroprijatij (na primere Voronezhskoj oblasti): dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.27. Sherbinina Svetlana Vasil'evna. Voronezh, 2006. 54 p.
9. Nafikova E. V. Ocenka i prognozirovanie geojekologicheskij opasnyh prirodno-tehnogennyh processov na vodosbore reki: dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.36. Nafikova Elvira Valerikovna. Ufa, 2013. 230 p.
10. Gidrologicheskie ezhegodniki. M., 1936—2010. V. 4. Vyp. 5—7.



Н. Ю. Цвиленева, канд. техн. наук, доц., e-mail: nina.cvileneva@mail.ru,
Ю. Н. Эйдемиллер, канд. техн. наук, доц., **А. С. Швец**, инж., **А. П. Яханов**, студент,
Уфимский государственный авиационный технический университет

Анализ техногенного риска при функционировании предприятия нефтепереработки на основе ГОСТ Р 54144—2010 Менеджмент рисков

Рассмотрены вопросы оценки техногенного риска при функционировании предприятия нефтепереработки на основе ГОСТ Р 54144—2010. Анализ риска проведен в соответствии с методологией идентификации инцидентов, представляющих существенные угрозы (МИСУИ). Проведено сравнение классического подхода к построению дерева отказов с подходом, предлагаемым в МИСУИ. В качестве возможной аварии рассмотрено разрушение экстракционной колонны установки селективной очистки масел. Проведена структуризация данных объекта для идентификации инцидентов, а также ассоциирование каждого выбранного оборудования с критическими событиями, приводящими к аварии. Рассмотрены события, которые могут привести к данной аварии и последующему развитию чрезвычайной ситуации. Для выбранного в качестве примера критического события построена схема "Песочные часы", включающая дерево отказов и дерево событий.

Ключевые слова: оценка риска, идентификация инцидентов, нефтепереработка, взрыв, пожар, дерево отказов, дерево событий, критическое событие, барьер безопасности

1. Методологические подходы и нормативные документы

В последние годы вышел ряд документов, содержащих основные подходы и рекомендации по управлению техногенным риском. Настоящая статья посвящена анализу ГОСТ Р 54144—2010 Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Идентификация инцидентов [1] (далее — Руководство) и его практическому применению при анализе риска функционирования нефтеперерабатывающего предприятия. Рассматриваемое Руководство фактически полностью основывается на европейском проекте АРАМИС и разработанной в его рамках методологии оценки риска промышленных аварий. Проект АРАМИС основан на применении двух методологий, принятых в странах ЕС. Первая из них — это методология идентификации инцидентов, представляющих существенные угрозы МИСУИ (Методология Идентификации Серьезных Угрожающих Инцидентов). Русская аббревиатура соответствует английской МИМАН (Methodology for the Identification of Major Accident Hazards). Вторая методология — МИЭСИ (Методология Идентификации Эталонных Сценариев Инцидентов) соответствует английской MIRAS (Methodology for the Identification of Reference Accident Scenarios).

В Руководстве подчеркивается, что приведенные классификации разновидностей риска, опасностей, событий и оборудования выбраны на основе использования европейского подхода, примененного в Директивах ЕС 96/82/ЕС (SEVESO II) и 67/548/ЕС, и преследуют исключительно информационные и методические цели. Эти классификации и методология не могут быть использованы вместо классификаций и методологий, установленных в нормативных правовых документах для регулятивных целей, а также для целей государственного контроля и надзора. Применение Руководства носит исключительно добровольный характер и призвано содействовать развитию организационных мер безопасности в тех случаях, когда существующих рекомендуемых нормативных документов недостаточно для однозначного достижения необходимых целей регулирования на предприятиях [1].

Целью проекта АРАМИС является построение новой методологии оценки риска в промышленности, сочетающей как детерминистский, так и рискориентированный подходы с акцентом на последний. Это означает рассмотрение полного спектра возможных событий и аварийных последовательностей, использование вероятностных показателей, учет неопределенности с использованием нечеткого подхода. При этом предусматривается жесткое постулирование выполнения системы правил, требований, сформулированных на

основе многолетнего опыта эксплуатации промышленных объектов, минимизация риска, разработка и повышение эффективности систем безопасности. Значительное внимание уделяется организационному аспекту безопасности.

Методология МИСУИ предназначена для сбора информации, необходимой для идентификации потенциально опасного оборудования на предприятии и выбора того, которое может быть связано с возникновением значительных инцидентов. Дерево отказов и дерево событий при этом связываются через критическое событие (критическим событием является вершина, или головное событие дерева отказов, оно же является исходным для последующего дерева событий). Таким образом, деревья отказов и деревья событий строятся для каждого критического события на основе родовых деревьев, предлагаемых данной методологией. Комбинация дерева отказов и дерева событий составляет схему "Песочные часы" [1]. Схема "Песочные часы" приведена на рис. 1.

Вместе с тем, возникают вопросы, связанные с использованием дерева отказов, дерева событий, трактовки их элементов, расчета вероятностей критических событий и их последствий с учетом так называемых барьеров безопасности, важной составляющей методологии МИСУИ. Затруднения могут быть связаны с непривычной для пользователей терминологией, касающейся структуры дерева отказов и дерева событий, а также сочетанием использования этих традиционных моделей со сравнительно новыми элементами — барьерами безопасности, которые могут представлять собой физические и инженерные системы или человеческие действия, основанные на специальных процедурах или же административном регулировании. Примеры таких барьеров: клапан сброса давления,

контроль температуры, антикоррозионное покрытие, молниеотвод и т. п. (на дереве отказов), использование водяной завесы при тушении пожара, аварийная вентиляция и т. п. (на дереве событий).

Схема "Песочные часы" как сочетание в рамках одной схемы дерева отказов (левая часть) и дерева событий (правая часть) в соответствии с методологией МИСУИ строится в предположении, что исследуемый объект не имеет изначально никаких систем обеспечения безопасности, в том числе организационных (или же они неэффективны) [2]. Классификация событий дерева отказов при этом отличается от традиционной, для которой привычными являются следующие понятия [3]:

- "основное событие", которое далее не анализируется, так как о нем имеются существенные эмпирические данные, например, частоты и виды отказов получены при лабораторных испытаниях;
- "исходное (для данного дерева) событие" — событие, не рассматриваемое далее из-за недостатка данных или из-за несущественности;
- "промежуточное событие" — отказ, обусловленный исходными, основными событиями предыдущего уровня;
- "головное (критическое) событие" — нежелательное событие в вершине дерева отказов.

В ГОСТ Р 51897—2002 [4] говорится, что структура дерева отказов включает одно головное событие (авария, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих нижестоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи (сценарии аварий). Следует упомянуть также ГОСТ Р 51901.1—2002 [5], где используется традиционная классификация событий и структура дерева отказов и Методические указания [6].

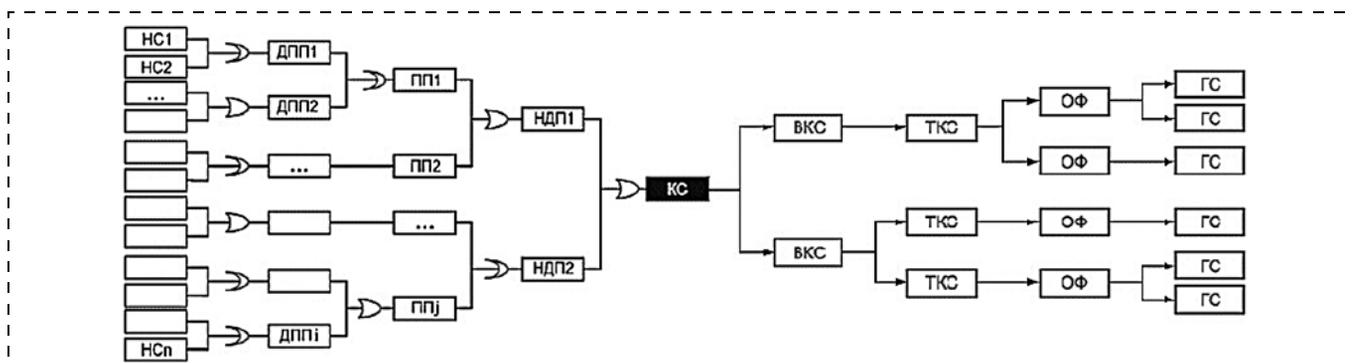


Рис. 1. Схема "Песочные часы", включающая дерево отказов (слева) и дерево событий (справа), связанные через критическое событие (КС). Обозначения на схеме: НС — нежелательное событие; ДПП — детальная прямая причина; ПП — прямая причина; НДП — необходимая и достаточная причина; ВКС — вторичное критическое событие; ТКС — третичное критическое событие; ОФ — опасный феномен; ГС — главное событие, определяемое как значимый эффект от опасного феномена для целевого объекта (человека, материального объекта, окружающей среды)



В Руководстве в схеме "Песочные часы" вместо вышеупомянутых терминов используются обозначения НС, ДПП, ПП, НДП. Относительно НС в тексте руководства сказано, что они наиболее часто представляют родовые события, которые касаются организации или поведения людей, рассматриваемые как причина критического события. Детальные прямые причины определяются как события, расположенные на схеме "Песочные часы" на стороне дерева отказов (неисправностей). В документе [7] нежелательные события дополняются текущими событиями, что может пониматься как некоторые сопутствующие события, определенные условия. ДПП объясняется как событие, которое приводит к прямым причинам, или, когда прямая причина является слишком общей, обеспечивает точность выявления истинной природы ПП. Прямая причина, в свою очередь, — это непосредственная причина для необходимых и достаточных причин, которые приводят к критическому событию. Для данного КС перечень НДП должен быть по возможности исчерпывающим. Это означает, что критическое событие произойдет только в том случае, если, по крайней мере, имеется одна НДП.

Такая структура дерева отказов, с одной стороны, дает возможность формализовать построение дерева отказов, что важно для составления компьютерных программ, с другой — не учитывает конкретные случаи, в которых на разных ветвях дерева может быть разное количество уровней, и тогда классификация событий по предлагаемой схеме является затруднительной [8].

Трактовка барьера безопасности в Руководстве как функции безопасности может создавать трудности и приводить к ошибкам при практическом использовании барьеров безопасности при анализе дерева отказов. Из сравнения с методологиями [9, 10], а также с исходным документом [2] очевидно, что в тексте Руководства присутствует ошибка: определение барьера безопасности отсутствует, а к термину "барьер безопасности" дается определение функции безопасности, что и приводит к противоречивым и бессмысленным утверждениям. Не вызывает сомнения факт, что текст в основном является результатом прямого перевода документа [2], и качество этого перевода не всегда выдержано на достаточно высоком уровне. Кроме того, если в исходном документе терминология приведена в алфавитном порядке, то в русском варианте, сохранившем последовательность терминов оригинала, эта глава выглядит совершенно хаотичной: порядок терминов и определений не соответствует ни алфавиту, ни смысловой последовательности. С этой точки зрения он явно проигрывает ГОСТ Р 51897—2002

[4], в котором приведены списки терминов на русском, английском и французском языках в алфавитном порядке.

При анализе уже функционирующих технических систем барьеры безопасности представляется возможным связывать на одном уровне с НС, ДПП и ПП и включать в минимальные отсечные сочетания — набор исходных событий, который гарантирует отсутствие головного события при условии невозникновения ни одного из составляющих этот набор событий [8].

2. Опыт практического применения ГОСТ Р 54144—2010

С учетом замечаний, приведенных выше, в соответствии с ГОСТ Р. 54144—2010 проведен анализ потенциальной опасности предприятия нефтепереработки (объект "N"). Объект разрушения — экстракционная колонна установки селективной очистки масел.

Итоговым результатом прогнозирования ЧС на установке селективной очистки масел на объекте "N" стала схема "Песочные часы", которая позволяет определить последствия от рассмотренного события.

2.1. Идентификации инцидентов, представляющих серьезные (существенные) угрозы

На первом этапе анализа риска МИСУИ обеспечивает последовательную схему сбора информации, необходимой для идентификации потенциально опасного оборудования на предприятии и выбора того, которое может быть связано с возникновением значительных инцидентов. Затем составляется список оборудования, связанного с потенциальными критическими событиями. Дерево отказов и дерево событий строятся для каждого критического события на основе родовых деревьев, предлагаемых данной методологией. Комбинация дерева отказов и дерева событий составляет схему "песочные часы", которая на этом этапе рассматривается безотносительно барьера безопасности. Этот этап позволяет реально идентифицировать угрозы. Следующий этап дает возможность идентифицировать риски, к которым приводят сценарии угроз и отказы в работе барьеров безопасности.

Сбор необходимой информации. Сбор информации предполагает получение максимально верной исходной информации и является одним из самых ответственных этапов в работе с информацией, поскольку от цели сбора и методов последующей обработки полностью зависит конечный результат работы всей информационной системы. На заключительном этапе сбора информации и она преоб-

Таблица 1

Сведения об исходных данных объекта для идентификации сценариев

Этапы	Описание требуемых данных
1	<p>Установка селективной очистки масел объекта "N":</p> <ul style="list-style-type: none"> — установка селективной очистки масел входит в состав масляного производства; — процесс селективной очистки основан на различной растворимости углеводородов и разности удельных весов метилпирролидона и сырья; — в состав установки селективной очистки масел объекта "N" входят: <ol style="list-style-type: none"> 1. Колонны (экстракционные, осушительные, отпарная); 2. Печи; 3. Емкости для хранения экстрактного вещества; 4. Подогреватели раствора (экстрактного, рафинатного); 5. Конденсаторы-холодильники; 6. Холодильники и т.д.
2	<p>Опасные вещества: метилпирролидон. Характеристики:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Температура кипения — 202 °С; 2. Температура вспышки — 104 °С; 3. Температура самовоспламенения — 2,1...53 °С; 4. IV класс токсической опасности; 5. ПДК в воздухе рабочей зоны — 100 мг/м³; 6. Реакционная способность — слабое основание, слабая кислота; 7. Характерный запах, запах амина; 8. Неагрессивное коррозионное воздействие
3	<p>Установка селективной очистки масел объекта "N"</p> <ul style="list-style-type: none"> — экстракционная колонна; — диаметр 3,2 м, высота 22,85 м; — рабочее давление 0,7 МПа, температура 100 °С; — используемое вещество — метилпирролидон; — содержание метилпирролидона в экстракционной колонне 61,9 т; — температура кипения 202 °С.
4	<p>Проявление инцидентов:</p> <ul style="list-style-type: none"> — пропуск сальникового уплотнения; — пропуск разъемного соединения; — повышение уровня колонны; — пропуски из-за коррозии и т.д.

разуется в данные, т. е. в информацию, представленную в формализованном виде. Сведения об исходных данных объекта "N", необходимые для идентификации сценариев инцидентов, представлены в табл. 1. Формирование сведений производится последовательно: этап 1 — представление общих данных о предприятии (расположение и планировка, краткое описание производственных процессов, краткое описание оборудования); этап 2 — перечень хранимых или обрабатываемых веществ, их опасные свойства; этап 3 — формирование данных по каждому виду оборудования (название, размеры, рабочие давление и температура, обрабатываемые и хранимые вещества и материалы, их количество в оборудовании, свойства опасных веществ, температура кипения) [1, п. 4.2].

2.2. Идентификация потенциально опасного оборудования на предприятии

Опасности, неопределенности и возможности сопутствуют любому виду деятельности, а результат их проявления для некоторого объекта характеризуют рисками. Существующие риски разнообразны, их можно подразделить на множество групп, т. е. классифицировать по различным признакам. Разновидности возможных рисков представлены в табл. 2. Из этой таблицы следует, что возможные опасности, реализующиеся при аварии на объекте "N" — это взрыв или воспламенения разной степени. Классификация оборудования, участвующего в технологическом цикле производственного процесса рассматриваемого объекта экономики, а также описание его характеристик представлены в табл. 3.

2.3. Выбор соответствующего опасного оборудования и вещества

Результаты ассоциирования каждого выбранного оборудования с критическими событиями представлены в табл. 4.

Основным технологическим оборудованием, участвующим в процессе селективной очистки масел на предприятии объект "N", обеспечивающим экстрактным раствором для переработки отработанных масел, является экстракционная колонна, содержащая пожаровзрывоопасное вещество метилпирролидон в количестве 61,9 т.

Исходя из данных табл. 4, можно сделать вывод, что наиболее подходящими критическими событиями для анализа риска возникновения чрезвычайной ситуации, связанной с разрушением экстракционной колонны, являются:

КС 5 — начало пожара;

КС 7 — трещина в корпусе/обшивке в условиях жидкой фазы;

КС 8 — утечка жидкости из трубопровода;

КС 11 — разрушение сосуда.

2.4. Деревья отказов и деревья событий для критических событий

Рассмотрим в качестве примера дерево отказов для критического события КС 7 (рис. 2). На рис. 3 приведено соответствующее дерево событий — графическая модель, отображающая события протекания аварии (выполнение функций безопасности или работа систем) согласно требованиям по ослаблению исходных событий. Дерево событий показывает, как отреагируют системы безопасности на рассматриваемое исходное событие, будут ли выполнены при этом функции безопасности, и в итоге, как отразится исходное событие на опасном объекте.



Таблица 2

Разновидности риска

Категории опасности	Код	Разновидности риска (РИ)
Окисление	РИ 9	Взрывоопасно при смешивании со взрывными материалами
Взрыв	РИ 3 РИ 5 РИ 16 РИ 19 РИ 44 РИ 102	Чрезмерный риск взрыва при ударе, трении, огне или других источниках возгорания Нагревание может вызвать взрыв Взрыв при смешивании с окислителями Может образовывать взрывоопасную перекись Риск взрыва при нагревании в условиях пространственного ограничения Пиротехника
Воспламенение	РИ 10 РИ 18	Воспламенение При использовании может образоваться воспламеняющая/взрывоопасная смесь пар—воздух
Сильное воспламенение	РИ 10 РИ 11 ПИ 30	Воспламенение (при конкретных температурах и давлении) Сильное воспламенение Может стать сильно воспламеняющимся при использовании
Чрезмерно сильное воспламенение	РИ 10 РИ 11 РИ 12	Воспламенение ($T > T$ кипения) Сильное воспламенение ($T > T$ кипения) Чрезмерно сильное воспламенение
Активная реакция с другими веществами	РИ 105 РИ 106	Контакт с другими веществами высвобождает воспламеняющийся газ В случае контакта с другими веществами может взорваться

Таблица 3

Классификация оборудования

Обозначение оборудования	Тип оборудования	Определение
Оборудование для хранения		
ОБ 1	Хранение твердых веществ	Хранение твердых веществ в виде порошка или пилюль (шариков). Эти вещества могут храниться в сыпучем состоянии или в брикетах (твердые вещества, хранящиеся в малых упаковках, здесь не рассматриваются)
ОБ 2	Хранение твердых веществ в малых упаковках	Хранение небольших количеств твердых веществ в пакетах или цистернах (баках) объемом менее 1 м ³
ОБ 3	Хранение жидкостей в малых упаковках	Хранение жидкостей в бутылках, цилиндрах или баках объемом не более 1 м ³
ОБ 4	Хранение под давлением	Цистерны (баки) для хранения при температуре окружающей среды и давлении выше 1 бар (давление за счет введенного вещества, обычно инертного газа). Хранящееся вещество может быть сжиженным газом под давлением (две равновесные фазы) или газом под давлением (одна фаза)
ОБ 5	Хранение при давлении при помощи наполнителя	Цистерны (баки) для хранения при температуре окружающей среды и давлении выше 1 бар (добавочное давление за счет наполнителя, обычно инертного газа). Хранящееся вещество находится в жидкой фазе
ОБ 6	Хранение в атмосферных условиях	Цистерны (баки) для хранения при температуре и давлении окружающей среды (давление за счет введенного вещества, обычно инертного газа). Хранящееся вещество находится в жидком состоянии
ОБ 7	Хранение при криогенных температурах	Цистерны (баки) для хранения при атмосферном или более низком давлении при низких температурах. Вещество хранится в виде замороженного сжиженного газа
Оборудование для впуска/выпуска		
ОБ 8	Оборудование для транспортировки под давлением	Транспортное оборудование, работающее при температуре окружающей среды и давлении выше 1 бар (как правило, за счет инертного газа). Вещество хранится в виде сжиженного газа под давлением (две равновесные фазы) или газа под давлением (одна фаза)
ОБ 9	Оборудование для транспортировки в условиях атмосферного давления	Транспортное оборудование, работающее при температуре окружающей среды и содержащее вещество в жидкой фазе



Продолжение табл. 3

Обозначение оборудования	Тип оборудования	Определение
Сети трубопроводов		
ОБ 10	Трубопроводы	Соединение при помощи трубопроводов различных единиц оборудования на предприятии. Соединения различных частей внутри оборудования при помощи трубопроводов рассматриваются как часть оборудования
Оборудование для производственных процессов		
ОБ 11	Оборудование промежуточного хранения, встроенное в процесс	Оборудование для хранения, которое находится внутри производственного оборудования
ОБ 12	Оборудование, включающее химические реакции	Оборудование, в котором протекают химические реакции
ОБ 13	Оборудование для физического или химического разделения веществ	Оборудование, в котором происходит физическое или химическое разделение
ОБ 14	Оборудование для производства и поставки энергии	Оборудование для производства энергии, например печи, нагреватели
ОБ 15	Упаковочное оборудование	Оборудование для упаковки материалов. Сама упаковка не включается, а только упаковочные системы
ОБ 16	Другое оборудование	Оборудование, не включенное в выше указанные классификации

Таблица 4

Критические события

Обозначение критического события	Критическое событие	Определение
КС 1	Разложение	Данное критическое событие относится только к твердым веществам и их хранению в твердой фазе. Соответствует изменению химического состояния вещества (потеря физической целостности под воздействием энергии/тепла источника или в результате реакции с химическим веществом (несовместимый реагент). Разложение вещества приводит (во вторичном и третичном критическом событии) к эмиссии токсичных продуктов или к отложенному взрыву образовавшихся воспламеняющихся веществ (реакция не спонтанная, но может быть активной)
КС 2	Взрыв	Данное критическое событие относится только к взрывоопасным твердым веществам с разновидностью риска - взрыв" их хранению в твердой фазе. Оно соответствует изменению физического состояния вещества под воздействием энергии/тепла источника или в результате реакции с химическим веществом (несовместимый реагент). Это изменение состояния подразумевает взрыв твердого тела с созданием повышенного давления вследствие активной и спонтанной реакции.
КС 3	Приведение материала в движение воздушным потоком	Критическое событие связано как с потенциально мобильными твердыми телами, так и с фрагментарными твердыми телами (порошок, пыль и т.п.), подверженными своему окружению (например, частички твердого вещества в условиях открытого хранения или на конвейерной ленте), и происходит в присутствии движения воздуха (например слишком сильная вентиляция)
КС 4	Приведение материала в движение потоком жидкости	Критическое событие связано как с потенциально мобильными твердыми телами, так и с фрагментарными твердыми телами (порошок, пыль и т.п.), подверженными своему окружению (например, частички твердого вещества в условиях открытого хранения или на конвейерной ленте), и происходит в присутствии движения жидкости (например потоп, утечка жидкости из другого оборудования)
КС 5	Начало пожара	Критическое событие соответствует специфической реакции между окисляющим веществом и воспламеняющимся или взрывающимся веществом или автономному разложению органической перекиси, приводящим к пожару. Это критическое событие относится только к веществам, относящимся к разновидности риска, приводящей к пожару. Это событие также может быть ассоциировано с пиротехническими веществами
КС 6	Трещина в корпусе/обшивке в условиях газообразной фазы	Событие — образование отверстия в корпусе оборудования, содержащего вещества в газообразной фазе (выше уровня жидкости, если существует и жидкая фаза), приводящее к непрерывной утечке. Отверстие может быть как следствием механического повреждения, обусловленного внутренними или внешними причинами, так и ухудшения механических свойств структуры материала корпуса. Это критическое событие включает также трещину в оборудовании, когда твердые материалы подвешены в воздухе или газе



Обозначение критического события	Критическое событие	Определение
КС 7	Трещина в корпусе/обшивке в условиях жидкой фазы	Данное критическое событие — возникновение отверстия в корпусе оборудования, содержащего вещество в жидкой фазе, приводящего к его непрерывному испусканию. Это отверстие может быть следствием как механического повреждения, обусловленного внутренними и внешними причинами, так и ухудшения механических свойств структуры материала корпуса
КС 8	Утечка жидкости из трубопровода	Это критическое событие — возникновение отверстия диаметром меньше номинального диаметра трубопровода. Это также может быть утечка из функциональных открытых частей трубопровода: соединительных фланцев, заглушек насоса, кранов и т.п. Эта утечка происходит из трубопроводов, транспортирующих жидкие вещества
КС 9	Утечка газа из трубопровода	Критическое событие — возникновение отверстия диаметром меньше номинального диаметра трубопровода или же утечка из функциональных открытых частей трубопровода: соединительных фланцев, заглушек насоса, кранов и т.п. Эта утечка происходит из трубопроводов, транспортирующих газообразные вещества. Это критическое событие включает также трещину в оборудовании, когда твердые материалы подвешены в воздухе или газе
КС 10	Катастрофический прорыв	Данное критическое событие — выход из строя оборудования, приводящий к полному высвобождению вещества. В зависимости от обстоятельств катастрофический прорыв может привести к превышению давления и выбросу веществ
КС11	Разрушение сосуда	Событие — выход из строя оборудования, приводящий к полному и мгновенному высвобождению вещества. Может быть также обусловлено уменьшением внутреннего давления в сосуде при наружном атмосферном давлении. Событие не приводит ни к превышению давления генерации, ни к выбросу веществ
КС12	Разрушение крыши	Данное событие может быть обусловлено уменьшением внутреннего давления в объеме, приводящим к разрыву мобильной крыши под действием атмосферного давления. Разрушение крыши рассматривается для условий атмосферного хранения

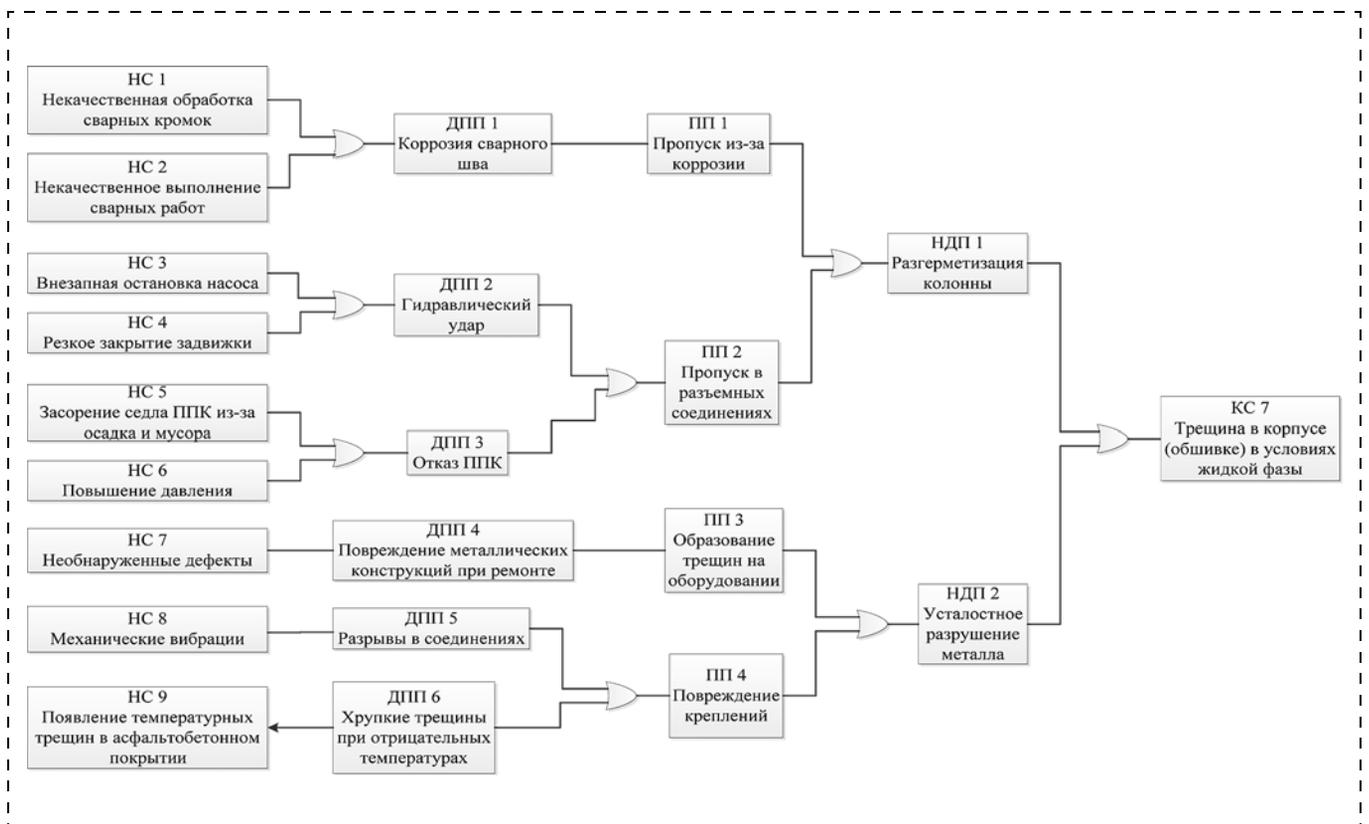


Рис. 2. Дерево отказов для критического события КС 7

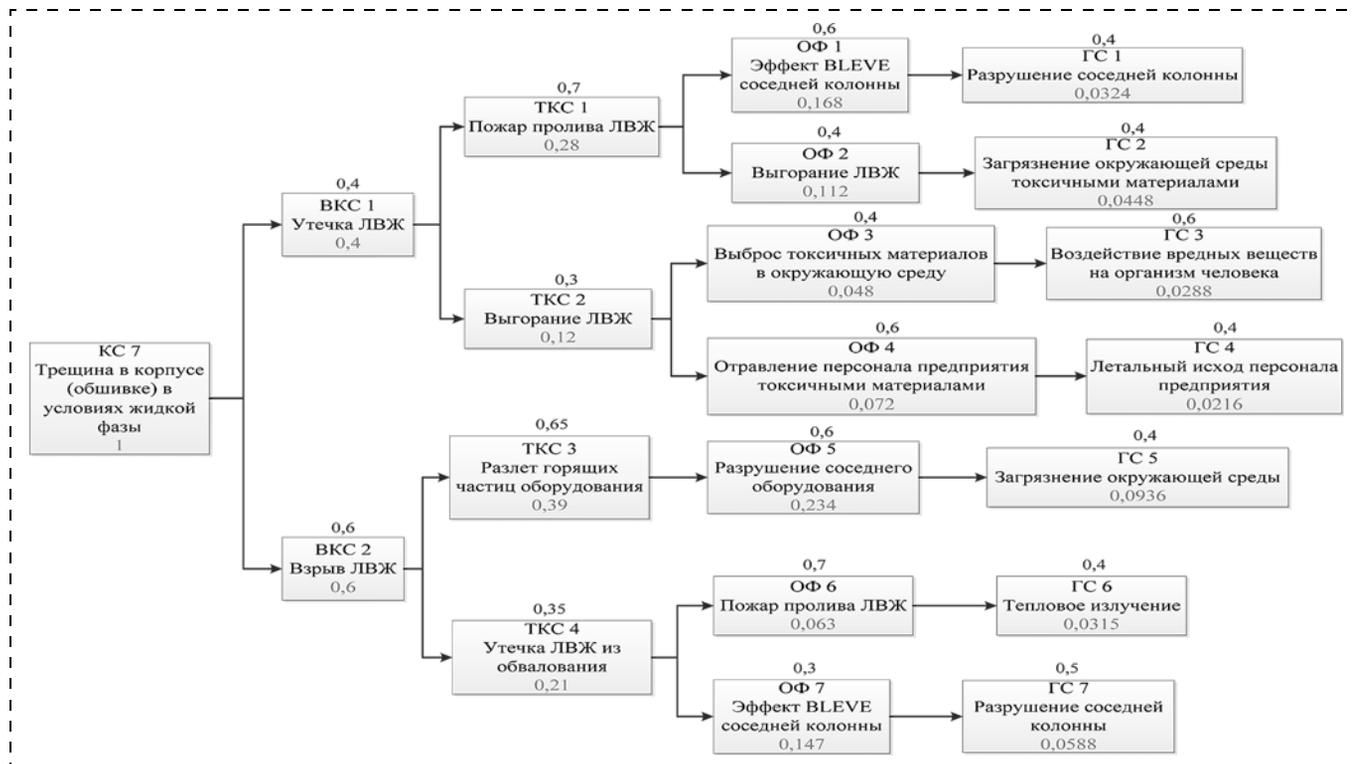


Рис. 3. Дерево событий для критического события КС 7

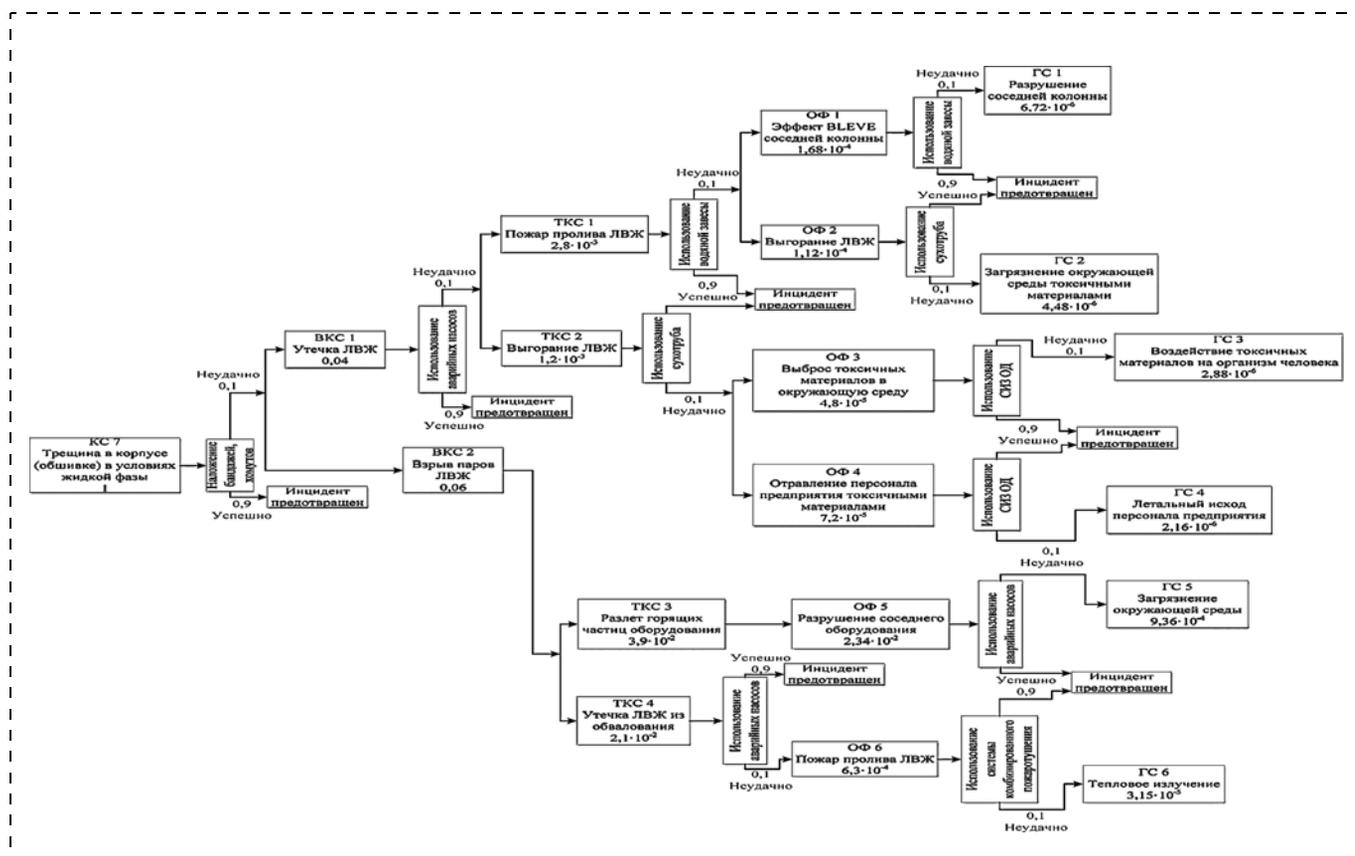


Рис. 4. Вероятность перехода событий с использованием барьеров безопасности для критического события КС 7



3. Оценка действий барьеров безопасности на дереве событий

Применение барьеров безопасности на дереве событий для выбранного критического события КС 7 показано на рис. 4. Барьеры безопасности могут прекратить дальнейшее развитие аварийной ситуации (дальнейший "рост" ветви на дереве событий). Результативность (успешность) барьера безопасности выражается либо в процентном отношении, либо в виде вероятности выполнения конкретной функции. Если результативность выражается в процентном отношении, она может изменяться в течение рабочего времени барьера безопасности. Барьер вводит разновидность логического перехода "ИЛИ", после которого одна ветвь дерева представляет результат успешного действия барьера и ведет к безопасной ситуации (при этом инцидент находится под контролем), а другая ветвь включает события, происходящие в случае отказа в срабатывании барьера, позволяя дальнейшее развитие сценария [1]. Так, на рис. 4 активация барьера безопасности "Использование аварийных насосов" после вторичного критического события ВКС-1 "Утечка ЛВЖ" позволяет с вероятностью 0,9 предотвратить развитие чрезвычайной ситуации.

Заключение

Несмотря на неточности, допущенные в Руководстве [1], его применение в рамках существующих методик позволяет провести достаточно полный анализ риска опасного объекта благодаря сис-

тематизации представления исходных данных и последовательности этапов оценки риска.

Список литературы

1. **ГОСТ Р 54144—2010** Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Идентификация инцидентов. Электронный текст документа подготовлен ЗАО "Кодекс" и сверен по: официальное издание М.: Стандартинформ, — <http://docs.cntd.ru/document/1200089296> 2012. 28.09.12.
2. **ARAMIS** (Accidental risk assessment methodology for industries in the context of the Seveso II directive / Contract number: EVG1 — CT — 2001 — 00036. — December 2004: http://mahb.jrc.it/fileadmin/ARAMIS/downloads/ARAMIS_FINAL_USER_GUIDE.pdf. — 2.10.2012
3. **Браун Дэвид Б.** Анализ и разработка систем обеспечения техники безопасности. — М.: Машиностроение, 1979. — 360 с.
4. **ГОСТ Р 51897—2002** Менеджмент риска. Термины и определения. — <http://gostexpert.ru/gost/gost-51897-2002> — 31.10.2012
5. **ГОСТ Р 51901.1—2002** Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем. — <http://www.opengost.ru>, 31.10.2012
6. **Методические указания** по проведению анализа риска опасных производственных объектов. РД 03-418-01, 2-е издание, исправленное и дополненное. — Москва: "Научно-техн. центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России", 2002, <http://tehnorma.ru/normativbase/10/10314/index.htm> — 10.09.12.
7. **Application** of ARAMIS in integrated Accidental Risk Assessment. Methodology for Industries developed in the framework of SEVESO II directive to the Canadian context. http://mahb.jrc.it/fileadmin/_ARAMIS/downloads/wpl/WP1_LP_04.pdf — 2.10.2012
8. **Цвиленева Н. Ю.** Методологические подходы к оценке риска // Технадзор. — 2013. — № 2 (75). — С. 71—73.
9. **Методология** оценки рисков для промышленных инцидентов с серьезными последствиями. — http://expert.gost.ru/NAV.php?ID=RA/HTML/RA_AM_01.html
10. **Методология** идентификации эталонных сценариев. http://expert.gost.ru/FIND_NOTES_SQL.php

N. Yu. Tsvileneva, Associate Professor, e-mail: nina.cvileneva@mail.ru,
Yu. N. Eydemiller, Associate Professor, **A. S. Shvets**, Engineer,
A. P. Yakhanov, Student, Ufa State Aviation Technical University,

Risk Analysis of Oil Enterprise on the Base of GOST R 54144—2010 Risk Management

The problem of an oil enterprise risk assessment is considered on the base of the federal standard GOST R 54144—2010. The risk analysis has been carried out according to the Methodology for the Identification of Major Accident Hazards (MIMAH). The traditional approach to fault trees design was compared with that of MIMAH. As a possible incident, a fracture of an extraction column of the selective oils purification plant has been considered. The necessary data of the object have been structured for identification of emergency scenarios and every selected equipment was associated with critical events, which could cause an incident. The critical events for the selected incident and further emergency development have been analyzed and a split of a case elected as an example for developing the "Sandglass" ("Bow-tie") scheme, including the fault tree and the event tree.

Keywords: risk assessment, incident identification, oil enterprise, refining, explosion, fire, fault tree, event tree, critical event, safety barrier

References

1. **GOST R 54144—2010** Menedzhment riskov. Rukovodstvo po primeneniju organizacionnyh mer bezopasnosti i ocenki riskov. Identifikacija incidentov. Jelektronnyj tekst dokumenta podgotovlen ZAO "Kodeks" i sveren po: oficial'noe izdanie. M.: Standartinform, — http://docs.cntd.ru/document/_1200089296 2012. 28.09.12
2. **ARAMIS** (Accidental risk assessment methodology for industries in the context of the Seveso ii directive / Contract number: EVG1 — CT — 2001 — 00036. — December 2004: http://mahb.irc.it/fileadmin/ARAMIS/downloads/ARAMIS_FINAL_USER_GUIDE.pdf. 2.10.2012.
3. **Braun David B.** Analiz i razrabotka sistem obezpecheniya tehniki beopasnosti. M.: Mashinostroenie, 1979. — 360 p.
4. **ГОСТ Р 51897—2002** Menedzhment riska. Terminy i opredelenija. — <http://gostexpert.ru/gost/gost-51897-2002> — 31.10.2012
5. **ГОСТ Р 51901.1—2002** Menedzhment riska. Analiz riska tehnologicheskikh sistem. — <http://www.opengost.ru>, 31.10.2012

6. **Metodicheskie ukazaniya** po provedeniju analiza riska opasnyh proizvodstvennyh ob#ektov. RD 03-418-01, 2-e izdanie, ispravlennoe i dopolnennoe. — Moskva: "Nauchno-tehn. centr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortehnadzora Rossii", 2002, <http://tehnorma.ru/normativbase/10/10314/index.htm> — 10.09.12.
7. **Application** of ARAMIS in integrated Accidental Risk Assessment. Methodology for Industries developed in the framework of SEVESO II directive to the Canadian context. http://mahb.jre.it/fileadmin/ARAMIS/downloads/wp1/WP1_LP_04.pdf — 2.10.2012.
8. **Tsvileneva N. Yu.** Metodologicheskie podhody k ocenke riska. *Tehnadzor*. 2013. N.2 (75). P. 71—73.
9. **Metodologija** ocenki riskov dlja promyshlennyh incidentov s ser'eznymi posledstvijami. — http://expert.gost.m/NAV.php?ID=RA/HTML/RA_AM_01.html
10. **Metodologija** identifikacii jetalonnnyh scenarijev. — http://expert.gost.ru/FIND_NOTES_SQL.php

УДК 628.357.4 + 504.054

И. В. Вдовина, канд. техн. наук, ст. препод., Уфимский государственный авиационный технический университет, e-mail: vdovina_iv@mail.ru,

Т. П. Смирнова, канд. хим. наук, зам. начальника отдела, Управление государственного аналитического контроля, Уфа

Доочистка сточных вод горно-обогатительного комбината с использованием элементов природно-техногенных ландшафтов

Приведены результаты исследования техногенно-измененных водных объектов, расположенных в зоне влияния горно-обогатительного комбината, с выявлением аборигенных видов высшей водной растительности, способных накапливать тяжелые металлы. Проанализированы пробы природных вод, растений на содержание тяжелых металлов методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Установлено, что перспективной площадкой для устройства биоплато является нижний бьеф технологического пруда.

Ключевые слова: тяжелые металлы, горно-обогатительный комбинат, биоплато, высшая водная растительность, болото, технологический пруд, река, тростник обыкновенный

Введение

Одним из достаточно эффективных, улучшающих качество воды в водоемах является метод, основанный на создании искусственных водно-болотных участков (constructed wetland): гидроботанических площадок и биоплато. Биоплато — искусственный мелководный проточный водоем с интенсивно культивируемой экосистемой, состоящей в основном из высших водных растений, которым сопутствует соответствующая фауна и комплекс микроорганизмов [1]. Гидроботанические площадки — искусственно созданные мелководья с посадками макрофитов и влаголюбивых ивовых кус-

тарников. Этот метод относится к биоинженерным методам восстановления окружающей среды [2].

В этом случае водные растения выполняют следующие основные функции:

— фильтрационную (способствуют оседанию взвешенных веществ);

— поглотительную (поглощение биогенных элементов и некоторых органических веществ);

— накопительную (способность накапливать некоторые металлы и труднорастворимые органические вещества);

— детоксикационную (растения способны накапливать токсичные вещества и преобразовывать их в нетоксичные) [3].



Наиболее часто используемой технологией для очистки природных и сточных вод, не обладающих высокой токсичностью, является фильтрование воды через волокнистые системы в виде нитчатых водорослей, корней высших растений или грибов. Большую опасность для высших растений представляют случайные залповые выбросы повышенных концентраций токсичных веществ. Грибы и водоросли в этом отношении более выносливы, а в случае гибели быстро восстанавливаются [4].

При очистке сточных вод чаще всего используют такие виды высших водных растений (ВВР), как камыш, тростник озерный, рогоз узколистый и широколистный, рдест гребенчатый и курчавый, спироделла многокоренная, элодея, водный гиацинт (эйхорния), касатик желтый, сусак, стрелолист обычный, гречиха земноводная, резуха морская, уруть, хара, ирис и пр. [5].

Как показали исследования, корневая система рогоза имеет высокую аккумулирующую способность относительно тяжелых металлов [6]. Концентрация металлов в корневой системе рогоза, который рос на берегах шламонакопителей электростанций, достигала (мг/кг): железа — 199,1, марганца — 159,5, меди — 3,4, цинка — 16,6. Известно, что камыш имеет высокие адаптивные свойства и способен прорасти в очень загрязненных промышленными сточными водами водоемах. Удельное поглощение минеральных веществ камышом достигает (г на 1 г сухой массы): кальция — 3,95, калия — 10,3, натрия — 6,3, кремния — 12,6, цинка — 50, марганца — 1200, бора — 14,6 [7]. Помимо этого, камыш активно аккумулирует марганец, ирис — кальций, осока — железо, ряска — медь, тростник — кадмий, медь, цинк [8—11].

По использованию высших водных растений для очистки сточных вод накоплен обширный мировой опыт.

Во многих странах Америки довольно широко используются системы очистки шахтных вод на плантациях камыша и тростника [12]. Процессы извлечения металлов из кислых шахтных вод были изучены на экспериментальном биолато в Айдахо, округ Колорадо. Выявлено, что железо и медь извлекаются более интенсивно, чем цинк и медь [13].

Широко распространено использование накопительной способности высших водных растений в Германии для очистки сточных вод от тяжелых металлов, в Китае и других странах.

В России с использованием результатов многолетних исследований была разработана конструкция биологического аэрируемого отстойника-фильтра БАОФ-25 для безреагентной очистки шахтных и других типов олиготрофных сточных

вод. Производительность аппарата составляет от 10 до 100 м³/ч [4].

В Республике Башкортостан также проводится изучение аккумулирующей способности аборигенных видов высшей водной растительности с целью создания биолато для очистки шахтных и подотвальных вод Сибайского горно-обогатительного комбината и карьерного озера Куль-Юрт-Тау [14, 15].

Характеристика объекта исследования

Исследования проводились на территории одного из административных районов юго-восточной части Республики Башкортостан, где расположен крупнейший горно-обогатительный комбинат по переработке медно-цинковых колчеданных руд. Основным объектом исследования явилась река Буйды — водоем рыбохозяйственного назначения, входящий в бассейн реки Оби. Длина реки — 17 км, средний годовой расход воды в створе сброса сточных вод — 0,081 м³/с, минимальный среднемесячный расход 95 %-ной обеспеченности в период зимней межени — 0,000 м³/с (в зимнее время река замерзает), летней межени — 0,001 м³/с.

Река Буйды берет свое начало в Буранцком болоте, лежащем в 1 км к югу от хвостохранилища горно-обогатительного комбината. Через Буранцкое болото проложен водоотводный канал промплощадки, соединяющийся с верхним участком русла реки Буйды; образовавшаяся система (водоотводный канал — верховье реки Буйды) — стала сбросным каналом, по которому сточные воды комбината направляются в Буйдинский технологический пруд.

Материалы и методы

Отбор и анализ проб проводился в соответствии с действующими нормативными требованиями. Достоверность полученных аналитических результатов подтверждалась метрологическим контролем с использованием следующих алгоритмов: проверка стабильности градуировочных характеристик; контроль погрешности с применением стандартных образцов. Все работы проводились в аккредитованной лаборатории на поверенном оборудовании с применением аттестованных методик. Отбор проб природных и сточных вод осуществлялся в соответствии с нормативными документами [16, 17], регламентирующими порядок проведения отбора, обеспечивающими его правильность и сохранность определяемых ингредиентов. Сточная вода отбиралась согласно "Инструкции по отбору проб для анализа сточных вод" [18]. Пробы поверхностных вод отбирались в слое 0...50 см, используя батометры объемом 1 дм³ [19]. Для определения об-

щих показателей и неорганических соединений пробы воды отбирались в пластиковую посуду с закручивающимися пробками.

Отбор проб растений производился в конце августа (по окончании вегетационного периода). Пробы растений, отобранные с целью изучения накопления рассматриваемых элементов в различных частях растения и доставленные в лабораторию, были подготовлены к разделному анализу корней и стеблей с листьями.

Для определения тяжелых металлов в водных пробах и растительных образцах использовался метод атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе Shimadzu AA-6200. Предварительно проводилась пробоподготовка методом полной кислотной минерализации до влажных солей с использованием азотной, соляной, хлорной кислот и перекиси водорода. Определение сульфатов в растительных образцах основано на методике определения растворимых сульфатов в почве. Сущность метода заключается в осаждении сульфат-иона хлористым барием и турбидиметрическом определении его в виде сульфата бария на спектрофотометре КФК-2.

Мониторинг бассейна реки Буйды с целью выявления естественных аналогов биоплато

Для обоснования применения технологии биоплато для снижения антропогенной нагрузки на малые реки в зоне влияния объектов горнодобывающей промышленности проведено обследование территории размещения горно-обогатительного комбината с целью выявления природных аналогов биоплато и оценки эффективности их функционирования. Обследование проводилось в конце вегетационного периода и заключалось в

натурных исследованиях изучаемой территории и отборе проб воды и растительных образцов (рисунок, см. 2-ю стр. облжки). В результате обследования в качестве аналогов рассмотрены следующие участки:

нижний бьеф технологического пруда, где сформировался заболоченный участок с характерной болотной растительностью;

Буранцкое болото;

сбросной канал с высшей водной растительностью;

устье реки Буйды.

В качестве фоновой территории рассматривалось Нияльское болото, сформировавшееся в близких геохимических условиях вне прямого воздействия сточных вод промплощадки комбината.

Основными аборигенными видами высшей водной растительности, характерными для всех рассмотренных участков, являются тростник обыкновенный (*Phragmites australis*), рогоз узколистый (*Typha angustifolia*), осока дернистая (*Carex caespitosa*), также встречаются травы рода полевица (*Agróstis sp.*).

Результаты анализа проб воды, отобранные на этих участках, позволяют выявить природно-техногенные ландшафты, которые обладают хорошей самоочищающей способностью с учетом роли высшей водной растительности. Данные по результатам мониторинга объектов исследования приведены в табл. 1, 2.

Из представленных данных видно, что практически все рассмотренные участки обладают хорошей очищающей способностью. Можно также заметить, что на болотистых участках (точки 6 и 7) отмечается повышенное, по сравнению с другими, содержание железа общего и марганца, что объяс-

Таблица 1

Результаты анализа проб воды по основным гидрохимическим показателям, отобранных на участках, покрытых высшей водной растительностью, и состав сбрасываемых сточных вод

Точки отбора*	рН, ед.	ХПК, мг O ₂ /л	Взвешенные вещества	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	HCO ₃ ⁻	Сухой остаток
Сточные воды	8,8	26,1	56,4	87,5	3089	23,2	2,05	—	—	5206
1	7,6	110	200	41,7	58	0,09	1,0	0,36	547	660
2	6,9	290	1075	349	1950	0,06	<1,0	0,11	114	5430
3а	6,3	1110	50	1216	2949	0,15	<1,0	0,11	26,2	5090
3б	6,9	710	30	1164	2745	0,14	<1,0	0,05	13,4	4875
4	7,5	95,0	25	78,2	1095	0,02	<1,0	0,31	336	2223
5а	8,2	42,8	19	57,3	375	0,02	<1,0	0,18	376	1291
5б	8,2	52	16	46,9	394	0,02	<1,0	0,17	396	989

* Точки отбора: 1 — Нияльское болото (фоновая территория); 2 — Буранцкое болото; 3а — сбросной канал, начало; 3б — сбросной канал, 1 км ниже начала; 4 — нижний бьеф технологического пруда; 5а — река Буйды, 500 м выше устья; 5б — река Буйды, устье.



Таблица 2

Результаты анализа проб воды по содержанию тяжелых металлов, отобранных на участках, покрытых высшей водной растительностью, и состав сбрасываемых сточных вод

Точки отбора*	Fe (общ)	Fe ³⁺	Mn ²⁺	Cu ²⁺	Zn ²⁺	Cd ²⁺
	мг/дм ³					
Сточные воды	0,210	—	0,500	0,024	0,090	0,003
1	0,860	0,85	0,545	0,007	<0,01	<0,001
2	0,800	<0,1	0,350	0,018	23,094	0,019
3а	0,029	<0,1	0,107	0,033	0,300	0,002
3б	0,018	<0,1	0,018	0,018	0,043	0,001
4	0,234	<0,1	0,740	0,010	0,050	<0,001
5а	0,074	<0,1	0,019	0,014	0,036	<0,001
5б	0,187	<0,1	0,051	0,025	0,137	0,002

* Точки отбора — см. табл. 1.

няется незначительной скоростью движения воды на этих участках и большим количеством высшей водной растительности, которая, с одной стороны, обладает аккумулярующей способностью по отношению к загрязняющим веществам, с другой стороны, при ее отмирании может являться источником вторичного загрязнения. В связи с этим при выборе месторасположения и организации работы биоплато следует выбирать участки со свободным движением воды и осуществлять своевременную уборку отработавшей высшей водной растительности.

Определение концентрирующей способности растений, произрастающих в зоне влияния горнорудного предприятия

Выявлено, что из основных видов наибольшей накопительной способностью обладает осока дернистая. Сравнительное содержание тяжелых металлов (ТМ) в зеленой массе растений в одной из рассматриваемых точек приведено в табл. 3.

При сравнении накопленных количеств тяжелых металлов в одном виде растения (тростник обыкновенный) на разных участках выявлены точки, наиболее подверженные антропогенному воздействию. Результаты представлены в табл. 4.

Таким образом, с учетом сложившихся условий и сформировавшегося биоценоза перспективным участком для обустройства биоплато, предназначенного для доочистки сточных вод горно-обогательного комбината, является заболоченный участок, расположенный в нижнем бьефе технологического пруда на реке Буйды, который является началом сбросного канала. Это обусловлено наличием хорошо развитой аборигенной растительности, адаптированной к повышенному уровню загрязнений, и ее накопительной способностью. Также выбор данной площадки обоснован тем, что он расположен максимально близко и к технологическому пруду, и к сбросу с очистных сооружений, что позволит проводить доочистку сточных вод, не допуская распространения загрязняющих веществ в дальнейшем по водотоку.

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов в растительных образцах, отобранных на Буранцком болоте

Вид растения	Содержание ТМ, мг/кг сухой массы				
	Fe	Cu	Zn	Mn	Cd
Тростник обыкновенный	37,8 ± 24,9	2,40 ± 1,44	23,0 ± 15,2	45,0 ± 29,7	0,0010 ± 0,0006
Рогоз узколистный	32,8 ± 21,6	2,00 ± 1,20	36,7 ± 24,2	70,7 ± 46,7	0,015 ± 0,009
Осока дернистая	216 ± 104	38,5 ± 25,4	394 ± 189	89,6 ± 59,1	0,872 ± 0,523

Таблица 4

Содержание тяжелых металлов в растениях вида *Phragmites australis* (тростник обыкновенный) как наиболее распространенного на исследуемых участках

№ п/п	Точка отбора	Содержание ТМ, мг/кг сухой массы				
		Fe	Cu	Zn	Mn	Cd
1	Нияльское болото	37,8	2,40	23,0	45,0	0,001
2	Буранцкое болото	73,1	6,66	45,9	32,2	0,010
3	Сбросной канал	177,2	10,5	77,8	259,4	0,068
4	Река Буйды, 500 м выше устья	65,4	4,28	63,3	104,6	0,188
5	Река Буйды, устье	155,3	2,72	73,1	170,3	0,583

Данное очистное сооружение позволит использовать возможности техногенно-измененной территории с целью снижения антропогенной нагрузки на более крупные реки, входящие в ту же речную сеть.

Список литературы

1. **Артамонов С. В.** Изучение качества стока реки Городни и вариант его очистки // Материалы Международной научно-практической конференции "Роль природообустройства в обеспечении устойчивого функционирования и развития экосистем". — М.: МГУП, 2006.
2. **Кривичкий С. В.** Очистка поверхностных стоков с использованием гидробиотических площадок // Экология и промышленность России. — 2007. — № 3. — С. 20—23.
3. **Тимофеева С. С.** Биотехнология обезвреживания сточных вод // Химия и технология воды. — 1995. — 17, № 5. — С. 525—532.
4. **Золотухин И. А.** Водоросли, корни высших водных растений и грибы как биофильтрующие системы в очистке воды // Успехи современного естествознания. — 2004. — № 9. — С. 42—44.
5. **Диренко А. А., Коцарь Е. М.** Использование высших водных растений в практике очистки сточных вод и поверхностного стока // СОК (сантехника, отопление, кондиционирование). — 2006. — № 4 (28). — С. 12—15.
6. **Samkaram Unni K., Philip S.** Heavy metal uptake and accumulation by *Thypha angustifolia* from wetlands around thermal power station // Int. J. Ecol. and Environ. Sci. — 1990. — 16, N. 2/3. — P. 133—144.
7. **Seidel K.** Gewasserreinigung durch hoehere Pflanzen // Garten und Landschaft. — 1978. — 88, N. 1. — P. 9—17.
8. **Грибулин Р. В., Грибулина Р. А., Кочуров Б. И.** Фиторе-медиация почв и промышленных сточных вод, загрязненных тяжелыми металлами // Экологические системы и приборы. — 2004. — № 2. — С. 35—40.
9. **Ольшанская Л. Н., Собгайда Н. А., Тарушкина Ю. А., Колесникова О. Н.** Исследование динамики накопления

- высшими водными растениями тяжелых металлов из высококонцентрированных растворов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2008. — № 3. — С. 39—41.
10. **Ali N. A., Berna M. P., Ater M.** Tolerance and bioaccumulation of cadmium, copper, zinc // Aquatic Botany. — 2004. — V. 80. — P. 163—176.
 11. **Claudia Bragato, Michela Schiavon, Riccardo Polese, Andrea Ertani, Marco Pittarello, Mario Malagoli.** Seasonal variations of Cu, Zn, Ni and Cr concentration in *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex steudel in a constructed wetland of North Italy // Desalination, V. 246. Iss. 1—3, 30 September 2009. — P. 35—44.
 12. **Dunbabin J. S., Bowner K. H.** Potential use of constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters containing metals // Sci. Total. Environ. — 1992. — 111, N. 2/3. — P. 56—60.
 13. **Steven D. Macherer, Thomas R. Wildeman.** Adsorption compared with sulfide precipitation as metal removal processes from acid mine drainage in a constructed wetland // Journal of Contaminant Hydrology. V. 9. Iss. 1—2. January 1992. P. 115—131.
 14. **Бактыбаева З. Б., Юнусбаев У. Б., Суяндукоев Я. Т.** Опыт создания искусственных растительных сообществ из аборигенных прибрежно-водных видов растений для целей биологической очистки // Башкирский экологический вестник. — 2008. — № 1. — С. 28—30.
 15. **Бактыбаева З. Б., Юнусбаев У. Б., Ямалов С. М., Бобров А. А.** Водная и прибрежно-водная растительность р. Таналык (Зауралье Респ. Башкортостан) // Вестник Оренбургского гос. университета. — 2009. — № 6. — С. 61—63.
 16. **ГОСТ 17.1.5.05—1985** Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков.
 17. **ГОСТ Р 51592—2000** Вода. Общие требования к отбору проб.
 18. **НВН 33-5.3.01—1985** Инструкция по отбору проб для анализа сточных вод.
 19. **ГОСТ 17.1.5.04—81** Охрана природы. Гидросфера. Приборы и устройства для отбора, первичной обработки и хранения проб природных вод. Общие технические условия.

I. V. Vdovina, Senior Lecturer, Ufa State Aviation Technical University, e-mail: vdovina_iv@mail.ru, **T. P. Smirnova**, Deputy Head of Division, State Analytical Control Department, Ufa

Tertiary Treatment Mountain-Concentrating Facility Sewage with Elements of Technologically-Modified Natural Landscapes

The results of research of technologically-modified water bodies located in the mountain-concentrating facility influence zone aims to identify native higher aquatic plants species which have the heavy metals accumulated ability. Samples of natural waters and plants were analyzed for heavy metal content by atomic absorption spectrometry. It is found that perspective platform for placing bioplato is downstream process pond.

Keywords: heavy metals, mountain-concentrating industrial complex, constructed wetland, higher aquatic plants, backwater, technological pond, river, *Phragmites australis*

References

1. **Artamonov S. V.** Izuchenie kachestva stoka reki Gorodni i variant ego oчитки. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Rol' prirodobustrojstva v obe-spechenii ustojchivogo funkcionirovaniya i razvitija jeko-sistem"*. M.: MGUP, 2006.
2. **Krivickij S. V.** Oчistka poverhnostnyh stokov s ispol'zovaniem gidrobotanicheskikh ploshhadok. *Jekologija i promyshlennost' Rossii*. 2007. N. 3. P. 20—23.
3. **Timofeeva S. S.** Biotehnologija obezvrezhivaniya stochnyh vod. *Himija i tehnologija vody*. 1995. 17, N. 5. P. 525—532.
4. **Zolotuhin I. A.** Vodorosli, korni vysshih vodnyh rastenij i griby kak biofil'truiruiushhie sistemy v oчитке vody.



- Uspehi sovremennogo estestvoznaniia*. 2004. N. 9. P. 42–44.
5. **Direnko A. A., Kocar' E. M.** Ispol'zovanie vysshih vodnyh rastenij v praktike ochistki stochnyh vod i poverhnostnogo stoka. *SOK (santehnika, otoplenie, kondicionirovanie)*. 2006. N. 4 (28). P. 12–15.
 6. **Samkaram Unni K., Philip S.** Heavy metal uptake and accumulation by *Thypha angustifolia* from wetlands" around thermal power station. *Int. J. Ecol. and Environ. Sci.* 1990. 16. N. 2/3. P. 133–144.
 7. **Seidel K.** Gewasserreinigung durch hoehere Pflanzen. *Garten und Landschaft*. 1978. 88, N. 1. P. 9–17.
 8. **Gribulin R. V., Gribulina R. A., Kochurov B. I.** Fitoremediacija pochv i promyshlennyh stochnyh vod, zagrizannyh tjazhelymi metallami. *Jekologicheskie sistemy i pribory*. 2004. N. 2. P. 35–40.
 9. **Ol'shanskaja L. N., Sobgajda N. A., Tarushkina Ju. A., Kolesnikova O. N.** Issledovanie dinamiki nakoplenija vysshimi vodnymi rastenijami tjazhelyh metallov iz vysokokontcentrirovannyh rastvorov. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2008. N. 3. P. 39–41.
 10. **Ali N. A., Berna M. P., Ater M.** Tolerance and bioaccumulation of cadmium, copper, zinc. *Aquatic Botany*. 2004. V. 80. P. 163–176.
 11. **Bragato C., Schiavon M., Polese R., Ertani A., Pittarello M., Malagoli M.** Seasonal variations of Cu, Zn, Ni and Cr concentration in *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex steudel in a constructed wetland of North Italy. *Desalination*. V. 246. Iss. 1–3. 30 September 2009. P. 35–44.
 12. **Dunbabin J. S., Bowner K. H.** Potential use of constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters containing metals. *Sci. Total. Environ.* 1992. 111. N. 2/3. P. 56–60.
 13. **Machemer S. D., Wildeman T. R.** Adsorption compared with sulfide precipitation as metal removal processes from acid mine drainage in a constructed wetland. *Journal of Contaminant Hydrology*. 1992. V. 9. Iss. 1–2. January. P. 115–131.
 14. **Baktybaeva Z. B., Junusbaev U. B., Sujundukov Ja. T.** Opyt sozdaniya iskusstvennyh rastitel'nyh soobshhestv iz aborigennyh pribrezhno-vodnyh vidov rastenij dlja celej biologicheskoy ochistki. *Bashkirskij jekologicheskij vestnik*. 2008. N. 1. P. 28–30.
 15. **Baktybaeva Z. B., Junusbaev U. B., Jamalov S. M., Bobrov A. A.** Vodnaja i pribrezhno-vodnaja rastitel'nost' reki Tanalyk (Zaural'e Resp. Bashkortostan). *Vestnik Orenburgskogo gos.universiteta*. 2009. N. 6. P. 61–63.
 16. **GOST 17.1.5.05—1985** Ohrana prirody. Gidrosfera. Obshhie trebovanija k otboru prob poverhnostnyh i morskikh vod, l'da i atmosferynyh osadkov.
 17. **GOST R51592—2000** Voda. Obshhie trebovanija k otboru prob.
 18. **NVN 33-5.3.01—1985** Instrukcija po otboru prob dlja analiza stochnyh vod.
 19. **GOST 17.1.5.04—81** Ohrana prirody. Gidrosfera. Pribory i ustrojstva dlja otbora, pervichnoj obrabotki i hranenija prob prirodnyh vod. Obshhie tehniczeskie uslovija.

УДК 628.3 (519)

Н. Н. Красногорская, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой,
А. И. Зельдова, канд. техн. наук, доц., **С. А. Мусина**, асп.,
e-mail: musinasa@gmail.com, **М. А. Малкова**, магистрант, **И. М. Платонова**, магистрант,
Уфимский государственный авиационный технический университет

Математическое описание процесса флокуляции металлсодержащих сточных вод гальванического производства с помощью полного факторного эксперимента

Обоснована необходимость математического описания процесса флокуляции металлсодержащих сточных вод гальванического производства. Приведены результаты планирования эксперимента процесса флокуляции с использованием флокулянта Enviro 4255y на модельном растворе сточной воды гальванического производства.

Ключевые слова: очистка сточных вод, гальваническое производство, флокулянты, планирование эксперимента, критерии оптимизации плана, полный факторный эксперимент

Гальванические покрытия используются практически во всех отраслях промышленности. В Российской Федерации по оценке специалистов сегодня существуют около 7000 таких цехов [1]. В общем потреблении воды машиностроительными предприятиями на долю гальванического производства приходится 30...50 %, из этого количества 80 % воды расходуется на промывку деталей.

В гальваническом производстве только 25...50 % металла идет на образование покрытий, а остальное количество уносится с промывными водами.

Ежегодно для промывки изделий после гальванических покрытий расходуется более 650 млн т чистой воды и при промывке изделий после гальвано-химических покрытий из рабочих ванн выносятся более 3300 т цинка, 2400 т никеля, 2500 т меди, де-

сятки тысяч тонн других металлов, кислот и щелочей [2].

Попадание неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод и других видов отходов, содержащих металлы, в водные объекты наносит ущерб народному хозяйству и окружающей природе не только из-за потерь, образующихся в производстве изделий, но и вследствие огромного негативного воздействия на экосистему водоем—почва—растение—животный мир—человек. Соединения, содержащие тяжелые металлы, оказывают следующими действиями:

- токсическим;
- канцерогенным (As, Se, Zn, Pd, Cr, Be, Pb, Hg, Co, Ni, Ag, Pt);
- мутагенным (ZnS);
- тератогенным (Cd, Pb, As, Co, Al и Li);
- аллергенным (соединения Cr^{6+}) [9].

Типовые российские и зарубежные схемы очистки сточных вод гальваники и подготовки металла включают в себя обычно стадии реагентной обработки, нормализации pH и отстаивания сточных вод. Такая схема не обеспечивает очистку воды до ужесточившихся норм сброса, предъявляемых местными водоканалами, из-за плохого отстаивания мелкодисперсных взвесей оксидов и гидроксидов металлов и устаревших подходов к реагентной очистке [3].

Общие сведения о процессе флокуляции

С целью повышения эффективности очистки сточных вод гальванического производства и для снижения негативного воздействия ионов тяжелых металлов на окружающую среду предлагается способ очистки сточных вод от взвешенных веществ с помощью флокулянтов [4]. Флокулянты — это водорастворимые высокомолекулярные соединения, которые при введении в дисперсные системы адсорбируются или химически связываются с поверхностью частиц дисперсной фазы и объединяют частицы в агломераты (флокулы), способствуя их быстрому осаждению [5].

Процесс флокуляции следует рассматривать как образование хлопьев при взаимодействии ком-

понентов двух разнородных систем — макромолекул растворимых полимеров и частиц коллоидных растворов и суспензий с четкой поверхностью раздела фаз (рис. 1) [6].

Таким образом, основным назначением флокулянтов является увеличение размера частиц за счет их слипания (агрегации) и как следствие повышение эффективности очистки воды отстаиванием, фильтрованием или флотацией без значительных капитальных затрат [5].

Флокуляция является сложным многофакторным процессом. Задачи оптимизации выбора наиболее эффективного флокулянта для конкретного типа сточных вод и технологии его применения требуют научно обоснованного подхода, в основе которого лежит изучение особенностей механизма флокуляции и технологических параметров, определяющих эффективность флокуляционной очистки сточных вод. Факторы, оказывающие влияние на процесс флокуляции, приведены в табл. 1 [6].

В настоящее время существует широкий ассортимент флокулянтов с большим диапазоном их физико-химических характеристик, который расширяет возможности метода. Однако недостаточная изученность влияния различных факторов на выбор флокулянта и параметры флокуляционной очистки реальных сточных вод, отсутствие приоритетных критериев и методологии выбора эффективного флокулянта создает трудности при оптимизации процесса. Следовательно, требуется проведение длительных и трудоемких исследований с использованием значительного числа образцов флокулянтов.

Теория и методика исследования

Планирование эксперимента предполагает определение наиболее эффективной стратегии его проведения с целью получения статистического материала, обладающего заранее заданными свойствами [7]. Планирование эксперимента применяется при решении таких задач, как оценка параметров распределения, проверка статистических гипотез при заданной мощности критерия, нахождение математической модели процесса с задан-



Рис. 1. Схема адсорбции макромолекул флокулянта на частицах дисперсной фазы



Таблица 1

Факторы, влияющие на процесс флокуляции

Группа факторов	Влияющие факторы	Приоритетные факторы
Характеристика флокулянтов	Молекулярная масса	Молекулярная масса
	Молекулярно-весовое распределение	Количество ионогенных групп
	Химический состав	Заряд
	Знак заряда ионогенных групп	
	Количество ионогенных групп	
	Регулярность расположения ионогенных групп	
	Товарный вид	
	Устойчивость при хранении	
Доза		
Характеристики сточных вод	Природа дисперсной фазы	Природа дисперсной фазы
	Концентрация дисперсной фазы	
	Плотность дисперсной фазы	
	Знак заряда дисперсной фазы	Знак заряда дисперсной фазы
	Величина заряда	
	Дисперсность (гидравлическая крупность частиц дисперсной фазы)	Дисперсность (гидравлическая крупность частиц дисперсной фазы)
	Температура	
Содержание растворенных ионогенных групп		
Технологические параметры	Способ ввода реагента	Условия смешения
	Условия смешения	
	Условия хлопьеобразования	Условия хлопьеобразования

ными статистическими свойствами, поиск оптимальных по заданным критериям условий протекания изучаемого процесса.

Под математическим описанием процесса понимается система уравнений (или одно уравнение), которая связывает функцию отклика с влияющими факторами. Задача планирования эксперимента может быть сформулирована следующим образом: требуется получить некоторое представление о поверхности отклика, описываемой моделью $y = f(x_1, x_2, x_n)$, где y — зависимая переменная — отклик; x_i — независимые переменные — влияющие на отклик факторы, которые можно варьировать в ходе эксперимента.

Неизвестная функция отклика чаще всего представляется полиномом k -й степени

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1)$$

где b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} — коэффициенты полинома.

Планирование эксперимента заключается в выборе на каждом этапе исследования оптимального в принятых критериях расположения экспериментальных точек в пространстве факторов. В качестве критериев оптимальности планов используются:

- минимизация числа опытов;
- простота вычислений коэффициентов функций отклика;
- независимость оценок коэффициентов функций отклика (ортогональность плана);
- однородность дисперсий отклика относительно центра плана (ротатабельность плана);
- минимизация объема эллипсоида рассеяния оценок коэффициентов модели (D -оптимальность плана).

Наибольшее применение нашли ортогональные планы в сочетании с критериями D -оптимальности. Как правило, необходимо найти поверхность отклика в какой-то определенной области изменения факторов. Наиболее широко применя-

Матрица полного факторного эксперимента 2^3

Номер точки плана, j	x_0	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	Отклик y_j
1	+	-	-	-	+	+	+	-	y_1
2	+	+	-	-	-	-	+	+	y_2
3	+	-	+	-	-	+	-	+	y_3
4	+	+	+	-	+	-	-	-	y_4
5	+	-	-	+	+	-	-	+	y_5
6	+	+	-	+	-	+	-	-	y_6
7	+	-	+	+	-	-	+	-	y_7
8	+	+	+	+	+	+	+	+	y_8

ется планирование на двух уровнях (экстремальный эксперимент), когда в эксперименте используются значения факторов, соответствующие верхней и нижней границам интервала его варьирования. Эти значения называются верхним и нижним уровнями и обозначаются +1 и -1 соответственно (или просто + и -). Экспериментальные планы, в которых все факторы варьируются только на двух уровнях, называются планами 2^k , где k — число варьируемых факторов [7].

При построении плана эксперимента необходимо исходить из некоторого априорного представления о возможном виде функции отклика (линейность, монотонность и т. п.). Наилучшим условиям, которые определяются на основе априорной информации, соответствует комбинация факторов. Сначала область варьирования факторов определяется исходя из предположения о линейности поверхности отклика внутри этой области. Если линейная поверхность отклика описывает экспериментальный материал неадекватно, то проводятся дальнейшие эксперименты по уточнению ее вида с помощью полиномов более высокого порядка.

Примером плана, позволяющего получить независимые оценки коэффициентов поверхности отклика, является полный факторный эксперимент (ПФЭ), реализующий все возможные неповторяющиеся комбинации уровней независимых факторов. ПФЭ рассматривается применительно к условиям активного экстремального эксперимента.

Поверхность отклика в ПФЭ для трех факторов ($k = 3$) имеет вид:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (2)$$

Пусть каждый фактор x_i варьируется от основного уровня на величину $\pm \Delta x_i$. Тогда с помощью преобразований $\bar{x}_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}$ можно перейти к кодированным переменным \bar{x}_i , принимающим на границах интервала варьирования значения ± 1 . План экстремального эксперимента принято записывать в виде матрицы (табл. 2), определяющей в кодированных переменных \bar{x}_i условия проведения эксперимента (в дальнейшем под x_i будем понимать кодированные переменные). В литературе принято k -факторный ПФЭ с изменением факторов на двух уровнях называть планом типа 2^k .

В дальнейшем будем обозначать через y_{jv} значение отклика, полученное в v -м эксперименте при условиях (сочетаний уровней факторов x_{ij}),

соответствующих j -й точке плана, а через x_{ij} — значение фактора x_i в j -й точке плана.

Для ПФЭ имеют место соотношения:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 2^k - 1); \quad \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 = n; \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} x_{\varepsilon j} = 0 \quad (i \neq \varepsilon; i, \varepsilon = 0, 1, \dots, 2^k - 1), \quad (4)$$

что соответствует свойству ортогональности столбцов матрицы плана.

Любой план 2^k может быть построен по следующему простому правилу: в столбце, соответствующему фактору x_i , знаки + и - чередуются через 2^{i-1} . План 2^k позволяет оценить 2^k коэффициентов регрессии b_i . Однако использовать ПФЭ для оценки коэффициентов при членах с кратностью нельзя, так как для b_0 и b_{ij} смешиваются [8].

Основным преимуществом ПФЭ является ортогональность матрицы плана, что позволяет существенно упростить вычисление коэффициентов уравнения отклика. Для любого числа факторов k выборочные оценки b_i вычисляются по формулам:

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^m b_{ij} \bar{y}_j, \quad \text{где } \bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{v=1}^m y_{jv}, \quad (5)$$

где m — число параллельных опытов в j -й точке плана; n — общее число точек плана.

Дисперсия, характеризующая разброс значений y_{jv} при постоянных условиях эксперимента (т. е. в одной точке плана), находится по формуле:

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{v=1}^m (y_{jv} - \bar{y}_j)^2. \quad (6)$$

Общая дисперсия, характеризующая разброс отклика безотносительно к условиям эксперимента, равна:

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2 = \frac{1}{n(m-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^m (y_{jv} - \bar{y}_j)^2. \quad (7)$$



Если количество параллельных опытов в точках плана различно, то:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (m_j - 1) S_j^2}{\sum_{j=1}^n (m_j - 1)}, \quad (8)$$

где m_j — число опытов в j -й точке плана.

Предварительная однородность дисперсий S_j^2 должна быть проверена одним из методов. Дисперсия коэффициента регрессии b_i определяется формулой:

$$S_b^2 = \frac{1}{n(m-1)} S_y^2. \quad (9)$$

Коэффициент b_i уравнения отклика с достоверностью α признается значимым, если $|b_i| > \frac{t_{1+\alpha}}{2}(f) S_b$, где $\frac{t_{1+\alpha}}{2}$ — квантиль распределения Стьюдента при $f = n(m-1)$ степенях свободы.

Для проверки адекватности математической модели отклика используется дисперсия:

$$S^2 = \frac{m}{n-d} \sum_{j=1}^n (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2, \quad (10)$$

где d — число коэффициентов аппроксимирующего полинома; y — значение отклика, предсказываемое регрессионной моделью.

Под адекватностью понимается способность модели предсказывать результаты эксперимента в некоторой области с требуемой точностью. Адекватность модели устанавливается сравнением дисперсий S^2 и S_y^2 с помощью критерия Фишера:

$$F = \frac{S^2}{S_y^2} \quad (11)$$

при $f_1 = n - d$ и $f_2 = n(m - 1)$ степенях свободы.

Если все коэффициенты линейной регрессии (в том числе коэффициенты при взаимодействиях) являются значимыми, то $d = n$ и не остается степеней свободы для проверки гипотезы адекватности. В этом случае рекомендуется поставить эксперименты в центре плана (т. е. при значении фактора $x_i = 0$). Тогда, если $|b_0 - y_0| < S_y$, линейная модель признается адекватной.

Результаты исследования

Для планирования эксперимента процесса флокуляции с использованием флокулянта Enviro 4255y на модельном растворе сточной воды проведена

Таблица 3

Состав модельного раствора

Металл	Концентрация, мг/л	Соль	Концентрация, г/л
Железо	2,2	FeCl ₃ · 6H ₂ O	0,0106
Цинк	0,31	ZnC ₁₄ H ₁₀ O ₆	0,0015
Медь	0,3	CuSO ₄ · 5H ₂ O	0,00117
Никель	1,4	NiCl ₂ · 6H ₂ O	0,0057
Кадмий	0,49	CdCl ₂ · 2,5H ₂ O	0,00102
Хром (3)	8,64	CrCl ₃ · 6H ₂ O	0,0441
Алюминий	0,15	Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18H ₂ O	0,00185
Марганец	0,07	MnCl ₂ · 4H ₂ O	0,000252

серия опытов по определению скорости осаждения взвешенных веществ. Модельный раствор сточной воды гальванического производства готовился путем добавления солей тяжелых металлов в дистиллированную воду и дальнейшим доведением рН раствора до значения ~9...9,5 раствором кальцинированной соды для обеспечения наилучшего осаждения. Состав модельного раствора представлен в табл. 3.

Из-за сложности визуального наблюдения осаждения взвешенных веществ, экспериментальные исследования проводились на модельном растворе с концентрацией ионов тяжелых металлов, увеличенной в 20 раз.

Флокуляция относится к классу разделительных процессов, для которых предложены десятки параметров оптимизации — технологические, термодинамические, экономические и т. д. В настоящем исследовании были выбраны три основных фактора, влияющих на процесс флокуляции: X_1 — концентрация флокулянта, мг/л; X_2 — скорость перемешивания, мин⁻¹; X_3 — время перемешивания, с. По классификации параметров оптимизации [8] характеристики количества и качества продукта отнесены к группе технико-технологических параметров. Если ограничиться параметрами этой группы, то следует учитывать, что они недостаточны универсальны, не учитывают экономику процесса. Но их использование вполне допустимо при решении конкретных задач оптимизации отдельных стадий, основных операций. Выбранные параметры просты, легко вычисляемы и имеют ясный физический смысл.

В процессе исследования найдены зависимости скорости осаждения взвешенных веществ от концентрации флокулянтов, скорости и времени перемешивания (рис. 2—4).

Из рисунков видно:

1 — скорость осаждения достигает максимального значения при концентрации флокулянта 4 мг/л; 2 — наибольшая скорость осаждения дос-

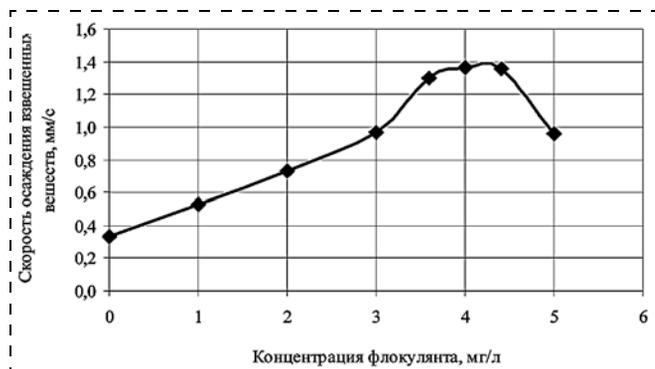


Рис. 2. Зависимость скорости осаждения взвешенных веществ от концентрации флокулянта Eлvigo 4255y



Рис. 3. Зависимость скорости осаждения взвешенных веществ от скорости перемешивания при использовании флокулянта Eлvigo 4255y

тается при скорости перемешивания 120 мин^{-1} ; 3 — наилучший эффект осаждения достигается при времени перемешивания 15 с.

На всех приведенных графиках видно, что скорость осаждения взвешенных веществ в зависимости от рассматриваемых параметров вначале увеличивается и, достигая максимального значения, снижается. Исходя из условия линейности рассматриваемого диапазона для планирования эксперимента и полученных значений параметров, выбраны верхние и нижние границы интервалов варьирования вышеприведенных факторов (табл. 4).

Матрица и результаты полного факторного эксперимента приведены в табл. 5.

Таблица 4

Уровни факторов и интервалы варьирования

Уровни факторов	X_1 , мг/л	X_2 , мин ⁻¹	X_3 , с
Основной	2,5	90	15
Нижний	1	60	10
Верхний	4	120	20
Интервал варьирования	1,5	30	5



Рис. 4. Зависимость скорости осаждения взвешенных веществ от времени перемешивания при использовании флокулянта Eлvigo 4255y

Таблица 5

Матрица ПФЭ и результаты эксперимента

№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}	x_{123}	x_1	x_2	x_3	$y_{\text{ср}}$
1	+	+	+	-	+	-	-	-	4	120	10	0,88
2	+	+	-	-	-	-	+	+	4	60	10	0,81
3	+	+	+	+	+	+	+	+	4	120	20	1,18
4	+	+	-	+	+	+	-	-	4	60	20	1,57
5	+	-	+	-	-	+	-	+	1	120	10	0,67
6	+	-	-	-	+	+	+	-	1	60	10	0,74
7	+	-	+	+	-	-	+	-	1	120	20	0,79
8	+	-	-	+	+	-	-	+	1	60	20	0,91

Результаты расчета коэффициентов регрессии уравнения представлены в табл. 6.

Далее была вычислена общая дисперсия, характеризующая разброс отклика безотносительно к условиям эксперимента:

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2 = 0,0057; (S_y = 0,075445). \quad (12)$$

Дисперсии коэффициентов регрессии

$$S_{b_i}^2 = \frac{1}{n(m-1)} S_y^2 = 0,000711; (S_{b_i} = 0,026674). \quad (13)$$

Таблица 6

Результаты расчета коэффициентов регрессии

Коэффициент регрессии	Значение коэффициента
b_0	0,945
b_1	0,166
b_2	-0,067
b_3	0,167
b_{12}	-0,016
b_{13}	0,097
b_{23}	-0,064
b_{123}	-0,051



Таблица 7

Результаты расчета статистики Стьюдента

Статистики Стьюдента	Значение статистики
t_0	35,419
t_1	6,233
t_2	-2,493
t_3	6,279
t_{12}	-0,617
t_{13}	3,623
t_{23}	-2,408
t_{123}	-1,915

Выбраны $\alpha = 0,95$ и найдены из таблицы критических значений t -критерия $t_{(1+\alpha)/2} = t_{0,975}$ при $f = 8(3-1) = 16$ степенях свободы: $t_{0,975}(16) = 2,12$. Результаты расчета статистики Стьюдента для коэффициентов модели представлены в табл. 7.

Поскольку значение коэффициентов $|t_{12}, t_{123}| < 2,12$, то коэффициенты b_{12}, b_{123} будут незначительно отличаться от нуля, а следовательно, будут незначимыми.

Вычислено значение $\sum_{j=1}^8 (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2 = 0,02$.

В данном случае число значимых коэффициентов модели равно $d = 6$ и $S^2 = 0,03$.

Адекватность модели устанавливалась сравнением дисперсий S^2 и S_y^2 с помощью критерия Фишера

$$F = \frac{S^2}{S_y^2} \text{ при } f_1 = n - d = 2 \text{ и } f_2 = n(m - 1) = 16$$

степенях свободы. Значение критерия Фишера $F = 6,07 (< 6,59)$, таким образом, модель признается адекватной.

Уравнение искомой модели в натуральном виде:

$$y = -0,17X_1 + 0,25X_2 + 0,04X_3 + 0,03X_1X_3 - 0,03X_2X_3 + 0,27. \quad (14)$$

В данном случае, все выбранные факторы оказывают влияние на процесс флокуляции модельного раствора с использованием флокулянта Envigo 4255y. Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов и чем больше численная величина коэффициента, тем большее влияние оказывает фактор. Если коэффициент имеет знак плюс, то с увеличением значения фактора параметр оптимизации увеличивается, а если минус, то уменьшается [8].

Таким образом, полученное уравнение искомой модели в натуральном виде позволяет без проведения экспериментальных исследований определить скорость осаждения взвешенных веществ и оптимальный технологический режим флокуляционной обработки при использовании флокулянта Envigo 4255y. На основе представленной методики планирования эксперимента проводится сравнительный анализ эффективности очистки различными флокулянтами без трудоемких и многочисленных экспериментов под воздействием различных технологических параметров, что позволяет существенно сократить унос тяжелых металлов в окружающую среду, снизить затраты при реконструкции существующих производств.

В заключение хотелось бы отметить, что математическое моделирование является одним из прогрессивных методов, которые широко применяются в современной прикладной науке. Оно позволяет существенно сократить срок освоения новых производств.

Список литературы

1. Колесников В. А., Ильин В. И. Экология и ресурсосбережение в электрохимических производствах. Механические и физико-химические методы очистки промывных и сточных вод: Учеб. пособие. В. И. Ильин. — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2004. — 220 с.
2. Типы сточных вод. [Электронный ресурс] / URL: http://www.akvater.ru/Типы_сточных_вод. (07.12.2013).
3. Нейтрализация и очистка сточных вод гальванических производств. [Электронный ресурс] / URL: <http://me-system.ru/нейтрализация-и-очистка-сточных-вод-г/> (07.12.2013).
4. Литвинцева О. В., Акулич Н. И. Повышение эффективности способов очистки сточных и оборотных вод на базе использования флокулянтов // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2010. — № 2. — С. 12—17.
5. Куренков В. Ф. Казанский государственный технологический университет. Химия // СОЖ. — 1997. — № 7. — С. 57—63. [Электронный ресурс] / URL: <http://www.masters.donntu.edu.Ua/2007/feht/zhmurko/library/2.htm>. (03.05.2014).
6. Высокмолекулярные вещества [Электронный ресурс] / URL: <http://ru-ecology.info/term/29127>. (03.05.2014).
7. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 816 с.
8. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — 279 с.
9. Экология гальванических производств. [Электронный ресурс] / URL: http://www.galvanicrus.ru/lit/articles/galvanic_industries_ecology.php. (07.12.2013).

N. N. Krasnogorskaja, Professor, Head of Chair, A. I. Zeldova, Associate Professor, S. A. Musina, Postgraduate Student, e-mail: musinasa@gmail.com, M. A. Malkova, Undergraduate Student, I. M. Platonova, Undergraduate Student, Ufa State Aviation Technical University

Mathematical Description of the Flocculation Process of Metal Containing Wastewater Using Full Factorial Experiment

The main purpose of flocculating agents is to increase the size of the particles due to their coalescence (aggregation) and increasing the efficiency of water purification by sedimentation, filtration or flotation without significant capital expenditures. The need for a mathematical description of the process of flocculation metal electroplating wastewater justified. Theory and methods of design of experiments was examined. Results of experiment planning process flocculation using flocculant Enviro 4255u with standardized test solution for electroplating wastewater are given. The resulting equation is let without a experimental studies to determine the rate of deposition of suspended solids and the optimal process conditions flocculation treatment.

Keywords: wastewater treatment, electroplating production, flocculants, experiment planning, criteria for the plan optimization, full factorial experiment

References

1. Kolesnikov V. A., Il'in V. I. Jekologija i resursosberezhenie v jelektrohimicheskijh proizvodstvah. Mehanicheskie i fiziko-himicheskie metody ochildki promyvnyh i stochnyh vod: Ucheb. posobie. M.: RHTU im. D. I. Mendeleeva, 2004. 220 p.
2. Tipy stochnyh vod. [Jelektronnyj resurs] / URL: http://www.akvatep.ru/Tipy_stochnyh_vod. (07.12.2013).
3. Nejtralizacija i ochildka stochnyh vod gal'vanicheskijh proizvodstv. [Jelektronnyj resurs] / URL: <http://me-sys-tem.ru/nejtralizacija-i-ochildka-stochnyh-vod-g/> (07.12.2013).
4. Litvinceva O. V., Akulich N. I. Povyshenie jeffektivnosti sposobov ochildki stochnyh i oborotnyh vod na baze ispol'zovanija flokuljantov. *Vestnik Zabajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2010. N. 2. P. 12–17.
5. Kurenkov V. F. Kazanskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet. *Himija. SOZh*. 1997. N. 7. P. 57–63. [Jelektronnyj resurs] / URL: <http://www.masters.donn-tu.edu.Ua/2007/feht/zhmurko/library/2.htm>. (03.05.2014).
6. Vysokomolekuljarnye veshhestva [Jelektronnyj resurs] / URL: <http://ru-ecology.info/term/29127>. (03.05.2014).
7. Kobzar' A. I. Prikladnaja matematicheskaja statistika. Dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov. M.: FIZMATLIT, 2006. 816 p.
8. Adler Ju. P., Markova E. V., Granovskij Ju. V. Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij. M.: Nauka, 1976. 279 p.
9. Jekologija gal'vanicheskijh proizvodstv. [Jelektronnyj resurs] / URL: http://www.galvanicrus.ru/lit/articles/galvanic_industries_ecology.php. (07.12.2013).

УДК 628.3

Н. Н. Красногорская, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, И. В. Кусова, канд. техн. наук, доц., С. А. Мусина, асп., e-mail: musinasa@gmail.com, Уфимский государственный авиационный технический университет

Усовершенствование технологии очистки сточных вод гальванического производства

Проанализированы существующие методы очистки сточных вод гальванического производства от соединений тяжелых металлов. Обоснована необходимость выбора аппаратов для очистки стоков гальванических производств. Предложена усовершенствованная технология очистки стоков гальванического производства.

Ключевые слова: гальваническое производство, тяжелые металлы, реагентная обработка, электрофлотация, ультрафильтрация, обратный осмос, фильтр-пресс



В технологических циклах большинства машиностроительных, металлообрабатывающих, приборостроительных, ремонтных и других предприятий широко применяют гальванические покрытия — электроосаждаемые металлические покрытия, наносимые на поверхность металлических изделий, а также полуфабрикатов-листов, труб, проволоки и т. п. Гальванические покрытия применяют для повышения коррозионной стойкости, износостойчивости и улучшения декоративного вида изделий. Их наносят водными растворами или растворами расплавленных солей с помощью электрического тока. При этом неизбежно образуются токсичные сточные воды, содержащие тяжелые металлы, которые нельзя сбрасывать без очистки в водоемы и канализацию, а очистка их обычными механическими и биохимическими методами невозможна.

С развитием промышленности, повышением требований к качеству и внешнему виду изделий наблюдается и интенсивное развитие гальванической техники. При этом увеличивается и количество сточных вод, подлежащих эффективному обезвреживанию и очистке.

При создании системы очистки воды необходимо проведение следующих работ [1]: определение степени загрязненности сточной воды; определение требований к очищенной воде; определение объема воды и периодичность ее сброса; выбор способа и технологической схемы очистки.

Для каждого типа загрязнений существуют свои методы очистки. Процесс очистки сточных вод производственного предприятия, как правило, включает несколько стадий, на каждой из которых возможно применение различные методов очистки сточных вод и соответствующего технологического оборудования [1]. На практике видно, что очистить сточные воды до нормативных показателей качества питьевой воды или воды, используемой на операциях промывки деталей в гальваническом производстве, гораздо легче, чем до ПДК сброса в водные объекты, имеющих рыбохозяйственное значение.

Это обстоятельство способствует более широкому внедрению и использованию систем оборотного водоснабжения предприятий на базе таких технологий, как мембранные процессы ультрафильтрации и обратный осмос, флотационные процессы и вакуумное выпаривание [2].

Одним из основных технических узлов системы оборотного водоснабжения является электрофлотационный модуль. Работа электрофлотатора основана на процессах выделения электролитических газов при электролизе воды и флотационном эффекте. Модуль может работать как в непрерыв-

ном, так и в периодическом режиме. В процессе электрофлотации происходит извлечение из сточных вод комплекса загрязняющих веществ: гидроксидов и фосфатов тяжелых металлов на 95... 99 %, взвешенных веществ на 95...99 %, нефтепродуктов на 70...90 %, поверхностно-активных веществ на 50...70 %, в присутствии различных анионов [3].

Электрофлотационное оборудование является достаточно компактным, высокопроизводительным, значительно упрощает технологические схемы очистки воды, процессы управления и эксплуатации сравнительно просто автоматизируются. Весьма позитивным является тот факт, что при электрохимической очистке сточных вод, как правило, не увеличивается анионный (солевой) состав предварительно очищенной воды. При этом значительно снижается количество и влажность образующегося осадка, который легко обезвоживается на недорогих рамных фильтр-прессах отечественного производства [4].

Для интенсификации процесса электрофлотации и повышения эффективности очистки собственно электрофлотации предшествует стадия нейтрализации кислых или щелочных компонентов, перевод ионов металлов в труднорастворимые соединения, т. е. образование твердой фазы, флокуляция и (или) коагуляция. Электрофлотатор может работать как самостоятельно, так и в комбинации с другим оборудованием, например в качестве промежуточного звена (отстойник — фильтр) между грубой (реагентной) и тонкой очисткой (ультрафильтрация — обратный осмос).

Очистка сточных вод методом электрофлотации сопровождается такими процессами, как снижение концентрации бактерий и микроорганизмов, мутности и химического потребления кислорода (ХПК). Благодаря этим особенностям процесса снижается нагрузка на установку микро-, ультрафильтрации, что продлевает периоды времени между ее регенерациями и срок службы мембранных элементов.

Последующие микро-, ультрафильтры выполняют функцию промежуточного технологического узла системы оборотного водоснабжения, обеспечивают очистку воды от растворимых высокомолекулярных органических соединений после электрофлотационной очистки и перед подачей воды на установку обратного осмоса [2].

Микрофильтрация и ультрафильтрация применяются как альтернатива глубинной фильтрации. Мембраны для микро-, ультрафильтрации наиболее распространены на рынке и являются наименее дорогостоящими. Типы мембран изготавливаются из полипропилена, акрилонитрила, нейлона, фторопласта и керамики [4].

Установки обратного осмоса обеспечивают возможность очистки воды одновременно от катионов и анионов в растворенном состоянии, низкомолекулярных органических соединений и других вредных примесей [5]. Такая установка выполняет в системе замкнутого водооборота две важные задачи:

- обессоливание (до 75 %) предварительно очищенных от дисперсных веществ сточных вод;
- возврат очищенной воды (до 95 %) в гальваническое производство на операции промывки деталей и приготовления растворов электролитов.

Надежность установок обратного осмоса повышается в результате применения резервного оборудования с возможностью его многофункционального использования, оптимизации количества мембранных элементов в каждой секции аппарата. Установка оснащается компьютерной системой поиска отказавшего мембранного элемента и модуля [2].

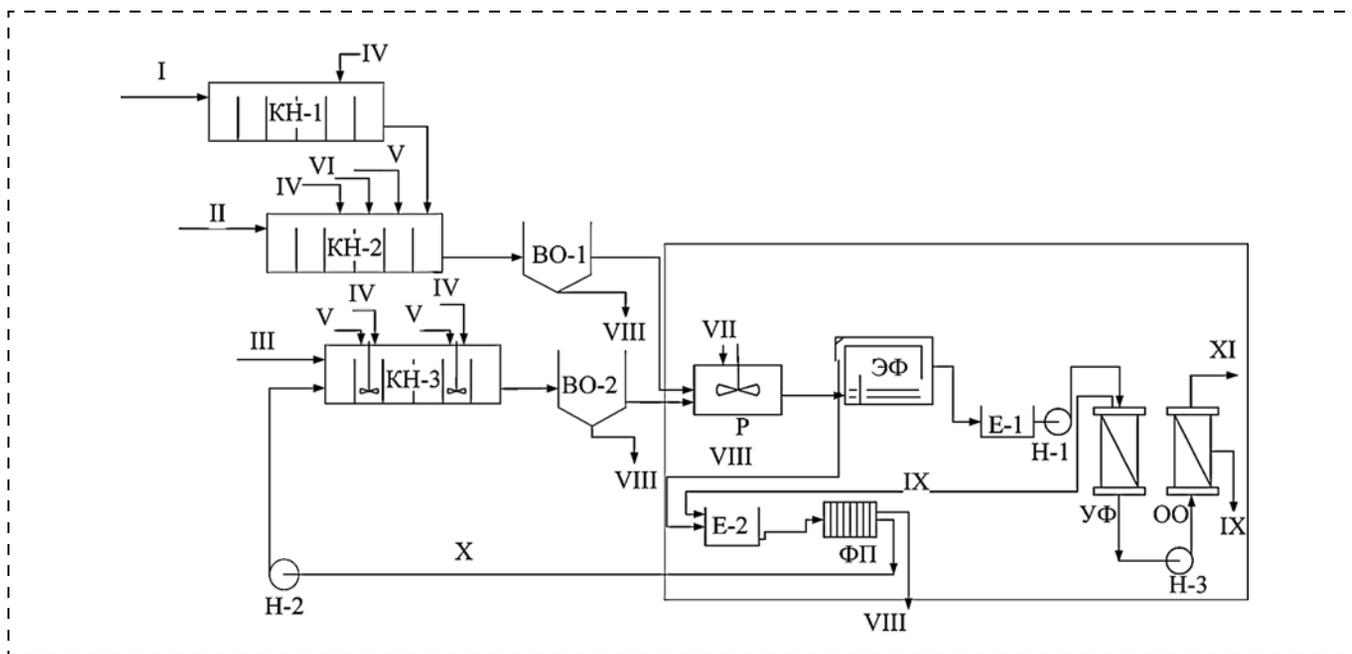
На рисунке представлена принципиальная технологическая схема очистки сточных вод гальванического производства, которая отражает возможность усовершенствования технологии реагентной очистки путем ввода в технологическую схему электрофлотатора и установок ультрафильтрации и обратного осмоса.

Сточные воды с гальванических производств поступают на очистные сооружения тремя потоками: цианистым I, хромистым II и кислотно-щелочным III, а затем в соответствующие загрязнителям камеры нейтрализации КН-1, КН-2, КН-3. Каждая из камер разделена на шесть секций, в которые поступенчато подается сернокислое железо IV, сульфит натрия V и сода VI. На существующих очистных сооружениях используется реагентный метод.

Цианосодержащие сточные воды I поступают в камеру нейтрализации КН-1, где поддерживается щелочная среда $\text{pH} > 7$ (реагент сернокислое железо IV), впоследствии смешиваясь с хромистым потоком II.

Хромосодержащие сточные воды II поступают в камеру нейтрализации КН-2. В хромистый поток II добавляют сернокислое железо IV (с двух сторон), контролируется уровень pH , который должен быть в пределах 8,5...9,5, и добавляется сода VI для доведения pH раствора до нормы. Происходит смешение цианистого потока I с хромистым II и добавляется сульфит натрия V. Из последнего отсека камеры нейтрализации КН-2 в отстойник ВО-1 подается уже хромисто-цианистый поток.

У кислотно-щелочных сточных вод III нормальный уровень $\text{pH} = 8,5...9,5$. Если $\text{pH} > 9,5$ добавляют сернокислое железо IV, если $\text{pH} < 8,5$ добавляют соду VI. В двух отсеках камеры нейтрализации КН-3, где происходит добавление реактивов, установлены мешалки, способствующие лучшему перемешиванию раствора. После этой камеры поток подается в вертикальный отстойник ВО-2, который отличается небольшой длиной и



Принципиальная технологическая схема очистки сточных вод гальванического производства:

КН — камера нейтрализации; ВО — вертикальный отстойник; P — реактор-флокулятор; ЭФ — электрофлотатор; УФ — ультрафильтрационная установка; E — накопительная емкость; ФП — рамный фильтр-пресс; H — насос; ОО — установка обратного осмоса; I — цианистый поток; II — хромистый поток; III — кислотно-щелочной поток; IV — сернокислое железо; V — сульфит натрия; VI — сода; VII — флокулянт; VIII — шлам; IX — концентрат; X — фильтр; XI — очищенная вода



большой глубиной. Гальваношлам VIII от вторичных отстойников ВО-1 и ВО-2 отводится как отход.

Далее хромисто-цианистые и кислотнo-щелочные стоки из отстойников ВО-1 и ВО-2 направляются в реактор-флокулятор Р, где происходит смешение потоков и ввод необходимого количества флокулянта VII для интенсификации процесса флотации. После реактора-флокулятора Р поток поступает в электрофлотатор ЭФ. После наполнения аппарата ЭФ включают источник питания, и на электроды подается ток. Очищенная вода через патрубки вытекает из электрофлотатора и поступает в накопительную емкость Е-1. Удаление флотошлама (VIII) из электрофлотатора происходит через патрубков в емкость Е-2. Выделяющиеся газы удаляются вытяжным зонтом, расположенным над электрофлотатором.

Вода из емкости Е-1 с помощью насоса Н-1 подается на ультрафильтрационную установку (УФ), где проходит через мембранный слой аппарата ультрафильтрации. Под действием трансмембранного давления вода проходит вертикально через мембранный слой. Гидроксиды тяжелых металлов и органические молекулы задерживаются на мембране, образуя поток концентрата IX, который направляется на фильтр-пресс ФП для обезвоживания через емкость Е-2.

Ультрафильтрационный модуль УФ не очищает от хлоридов и сульфатов, поэтому поток воды насосом Н-3 направляется на очистку в установку обратного осмоса ОО. Отделение деминерализованной воды от минерализованной происходит через тонкопленочную полупроницаемую мембрану под давлением выше осмотического (баромембранный процесс), при этом образуется поток очищенной воды XI, который может идти на обратное водоснабжение. Физико-химические показатели воды для обратного водоснабжения гальванического

производства должны удовлетворять требованиям ГОСТ 9.314—90 [6].

Из емкости Е-2 флотошлам VIII обезвоживается на рамном фильтр-прессе ФП до влажности 70 %. Обезвоженный шлам идет на утилизацию и может быть использован в качестве вторсырья в строительном производстве. Фильтрат X из фильтр-пресса ФП с помощью насоса Н-2 идет в камеру нейтрализации кислотнo-щелочного потока КН-3 для разбавления.

Главными отличиями описанной системы очистки сточных вод от классической схемы являются [7]:

- создание при модернизации очистных сооружений замкнутого цикла оборотного водоснабжения;
- более высокая степень надежности и автоматизации процесса водоочистки;

- более высокие капитальные затраты на приобретение оборудования, но существенно более низкие эксплуатационные затраты благодаря отсутствию необходимости ежегодной замены ионообменных смол, закупки реагентов для их регенерации, длительный (до 10 лет для керамических мембран и до 3 лет для полых волокон) срок службы мембранных элементов в установке ультрафильтрации, что впоследствии приведет к значительной экономии финансовых средств предприятия;

- отсутствие возможности проскока тяжелых металлов остаточной концентрации при несвоевременной регенерации ионообменного оборудования, а также потребности в самих реагентах для регенерации и кондиционирования ионообменных смол, и, следовательно, значительное снижение анионного состава очищенных сточных вод.

В таблице приведена сравнительная характеристика концентрации загрязняющих веществ в стоках гальванического производства после различных методов очистки. Из представленных данных видно, что после процесса электрофлотации возможен проскок тяжелых металлов в концентрациях, пре-

Сравнительная характеристика концентрации загрязняющих веществ в стоках гальванического производства после различных методов очистки [6, 8]

Вещество	Концентрация вещества, мг/л			Допустимые значения показателей качества и ингредиентов воды по ГОСТ 9.314—90 (2 категория)
	Сточные воды	После электрофлотации	После ультрафильтрации	
Медь Cu^{2+}	5...30	0,3...0,8	0,1	0,3
Никель Ni^{2+}	5...30	0,2...0,7	<0,04	1
Цинк Zn^{2+}	5...30	0,3...0,7	<0,04	1,5
Хром Cr^{3+}	5...30	0,5...1,2	0,1	—
Железо Fe^{3+}	5...30	0,1	0,01	0,1
Алюминий Al^{3+}	5...30	0,2	<0,04	—
Свинец Pb	5...30	1...2	<0,04	—
Кадмий Cd^{2+}	5...30	1...2	0,1	—
Сульфаты SO_4^{2-}	800...1000	800...1000	800...1000	50
Хлориды Cl^-	100...200	100...200	100...200	35
ПАВ	1...5	0,5...2,5	0,1...0,5	1
Нефтепродукты	5...30	0,5...1	<0,05	0,3

вышающих нормативные показатели для воды оборотного водоснабжения. После процесса ультрафильтрации концентрации ионов тяжелых металлов достигают значений ниже допустимых значений. Такие тяжелые металлы, как свинец, кадмий, алюминий, хром (+3), удаляются при осуществлении реагентной обработки на начальном этапе очистки. Содержание сульфатов и хлоридов снижается на установках обратного осмоса.

Таким образом, применение усовершенствованной технологии очистки сточных вод гальванического производства позволит осуществить оборотное водоснабжение на большинстве машиностроительных предприятий России. Создание систем оборотного водоснабжения на промышленных предприятиях является хотя и достаточно сложной, но решаемой задачей. Современные технологии и оборудование для очистки сточных вод позволяют обеспечить получение воды любой требуемой степени чистоты из любой природной и/или сточной воды, при этом создание замкнутого водоснабжения может тормозиться лишь причинами экономического характера.

Список литературы

1. **Методика** очистки сточных вод. Экологический альянс [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.ecoa.ru/library.html>, свободный. Загл. с экрана. Яз Рус.
2. **Павлов Д. В., Вараксин С. О., Колесников В. А.** Обратное водоснабжение промышленных предприятий // Сантехника. — 2010. — № 2. — С. 30—39.
3. **Колесников В. А., Ильин В. И.** и др. Электрофлотационная технология очистки сточных вод промышленных предприятий / Под ред. В. А. Колесникова. — М.: Химия, 2007. — 303 с.
4. **Колесников В. А., Меньшутина Н. В.** Анализ, проектирование технологий и оборудования для очистки сточных вод. — М.: ДеЛи принт, 2005. — 266 с.
5. **Биохимические методы** очистки сточных вод [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ohrana-bgd.narod.ru/bgdl.html>, свободный. Загл. с экрана. Яз Рус.
6. **ГОСТ 9.314—90** Вода для гальванического производства и схемы промывок. Общие требования. — Введ. 1990. — М.: Стандартиформ, 1990. — 9 с.
7. **Транснациональный экологический проект** [Электронный ресурс]. — URL: <http://hydropark.ru/equipment/electroflotator.htm>
8. **Очистка** сточных вод РХТУ им. Д. И. Менделеева. Технопарк. [Электронный ресурс]. — URL: <http://enviropark.ru/course/category.php?id=13>

N. N. Krasnogorskaya, Professor, Head of Chair, **I. V. Kusova**, Associate Professor, **S. A. Musina**, Postgraduate Student, e-mail: musinas@gmail.com, Ufa State Aviation Technical University

Improvement Wastewater Treatment Technology of Galvanic Production

With the development of industry, increasing demands for quality and appearance of products intensively developed galvanic technology. This increases the amount of wastewater for effective decontamination and cleaning. After completion of the process galvanic plating formed toxic wastewater containing of heavy metals, which conventional mechanical purification and biochemical methods impossible removed. The article analyzes the existing methods of galvanic production wastewater treatment from heavy metals. Necessity of selecting devices for galvanic production wastewater treatment was substantiated. One of the main technical parts of the system of water recycling is electro flotation module. Application of ultra filtration and reverse osmosis are substantiated after step electro flotation. The advanced technology of galvanic production wastewater treatment was offered. The main advantages of the scheme provided water purification determined.

Keywords: galvanic production, heavy metals, chemical treatment, electroflotation, ultrafiltration, reverse osmosis, filter press

References

1. **Методика** очистки сточных вод. Экологический альянс [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.ecoa.ru/library.html>, свободный. Загл. с экрана. Яз Рус.
2. **Павлов Д. В., Вараксин С. О., Колесников В. А.** Обратное водоснабжение промышленных предприятий. *Сантехника*. — 2010. № 2. С. 30—39.
3. **Колесников В. А., Вин В. И.** и др. Электрофлотационная технология очистки сточных вод промышленных предприятий / Под ред. В. А. Колесникова. М.: Химия, 2007. 303 с.
4. **Колесников В. А., Меньшутина Н. В.** Анализ, проектирование технологий и оборудования для очистки сточных вод. М.: ДеЛи принт, 2005. 266 с.
5. **Биохимические методы** очистки сточных вод [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://ohrana-bgd.narod.ru/bgdl.html>, свободный. Загл. с экрана. Яз Рус.
6. **ГОСТ 9.314—90** Вода для гальванического производства и схемы промывок. Общие требования. Введ. 1990. М.: Стандартиформ, 1990. — 9 с.
7. **Транснациональный экологический проект** [Электронный ресурс] URL: <http://hydropark.ru/equipment/electroflotator.htm>
8. **Очистка** сточных вод РХТУ им. Д. И. Менделеева. Технопарк [Электронный ресурс] URL: <http://enviropark.ru/course/category.php?id=13>



УДК 504.064.36

Р. М. Хатмуллина, канд. хим. наук, нач. отдела, **В. И. Сафарова**, д-р хим. наук, начальник Управления, e-mail: guugak@mail.ru, Управление государственного аналитического контроля, Уфа,
А. М. Сафаров, канд. техн. наук, ст. препод., Уфимский государственный нефтяной технический университет

Эмиссия полициклических ароматических углеводородов в окружающую среду

Проведено исследование концентраций ПАУ в источниках выбросов различных предприятий промышленности и теплоэнергетики. Установлено, что ПАУ присутствуют в выбросах всех обследованных в данной работе источников. Концентрация бенз(а)пирена (индикаторного соединения) варьирует в диапазоне $<0,001...3,426$ мкг/м³. Максимальные концентрации ПАУ обнаружены в выбросах асфальтобетонных заводов. Построены кривые (концентрационные профили), отражающие количественное соотношение ПАУ в выбросах обследованных предприятий. Установлено, что для разных источников эмиссии конфигурация этих кривых является индивидуальной характеристикой. Обнаружена закономерность в изменении концентрационных профилей в ряду: источник эмиссии — природная среда. Показана возможность использования количественных соотношений ПАУ при значительных локальных выбросах в окружающую среду для поиска источника их эмиссии.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), бенз(а)пирен, промышленные выбросы, концентрационные профили, атмосферный воздух, источник загрязнения

Введение

Крупные промышленные регионы являются центром возникновения основных экологических проблем, большая часть которых связана с загрязнением окружающей среды токсичными веществами. Например, только энергетическая отрасль поставляет в атмосферу около 23 % суммарных выбросов от стационарных источников [1].

Среди компонентов газовых выбросов особое место занимают полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), в том числе бенз(а)пирен. Как известно, многие ПАУ и их производные обладают высокой канцерогенной и мутагенной активностью [2]. Поэтому выявление и изучение источников поступления этих соединений в окружающую среду является актуальной задачей.

Следует особо отметить, что степень воздействия вредных выбросов на атмосферный воздух в промышленно развитых центрах существенно повышается из-за сосредоточенности источников загрязнения. Близкое расположение к жилой зоне и множественность источников эмиссии загрязняющих примесей в атмосферу в таких регионах усложняет проведение экоаналитического контроля, поскольку в некоторых случаях необходимо не просто фиксировать концентрации соединений в воздухе, а выявлять влияние каждого источника.

Система экоаналитического контроля ПАУ в компонентах природной среды основана на определении только бенз(а)пирена, выбранного в качестве индикаторного соединения этой группы углеводородов. Однако для более правильной оценки состояния природной среды необходимо определение и других ПАУ [3]. В данной работе представлены результаты исследования источников выбросов промышленных предприятий и компонентов природной среды на содержание бенз(а)пирена и некоторых других приоритетных ПАУ.

Объекты и методы исследования

Определение ПАУ проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Анализ проб выполняли на жидкостном хроматографе фирмы "Waters" (США), включающем в себя флуориметрический детектор Waters 474 с программированием длин волн; градиентный насос высокого давления; универсальный инжектор УБК; аналитическую колонку Vydac 201 TP 54-C₁₈ (250 × 4,6 мм; 5 мк). Обработку полученных данных проводили с помощью программного обеспечения Millennium³² (REV.3.2, Waters). Концентрации ПАУ рассчитывали методом внешнего стандарта. Для этого использовали искусственную смесь, содержащую нафталин, аценафтен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, бенз(а)антрацен, хризен,

бенз(*b*)флуорантен, бенз(*k*)флуорантен, бенз(*a*)пирен, дибенз(*a, h*)антрацен, бенз(*g, h, i*)перилен, индено(1, 2, 3-*c, d*)пирен. Градуировочные графики для каждого соединения строили, анализируя набор стандартных растворов с известной концентрацией.

Объектами исследования являлись пробы промышленных выбросов, снегового покрова, атмосферного воздуха. Отбор проб проводили в соответствии с нормативными документами [4, 5].

Обсуждение результатов

На территории Республики Башкортостан функционирует множество предприятий различных отраслей промышленности и теплоэнергетики, деятельность которых связана с высокотемпературными процессами и процессами сжигания органического топлива. Все эти предприятия являются потенциальными источниками эмиссии ПАУ в окружающую среду.

Диапазоны варьирования концентраций ПАУ в промвыбросах различных предприятий республики представлены в таблице. Анализ данных показывает, что бенз(*a*)пирен и другие ПАУ присутствуют в выбросах всех обследованных в данной работе источников. Концентрации ПАУ варьируют в широком диапазоне, например, содержание бенз(*a*)пирена составляет $<0,001...3,426$ мкг/м³. Кроме бенз(*a*)пирена в значительных концентрациях обнаруживаются нафталин, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бенз(*g, h, i*)перилен. Следует отметить, что все эти соединения отличаются не только физико-химическими характеристиками, но и токсическими свойствами [3].

Как видно из таблицы, максимальные концентрации ПАУ обнаружены в выбросах асфальтобетонных установок. Несмотря на периодичность их работы они являются значительными источниками загрязнения прилегающей территории этими соединениями. ПАУ являются также неотъемлемыми компонентами выбросов предприятий нефтяной отрасли, многочисленных котельных и т. д. Концентрации ПАУ в газовых выбросах этих предприятий ниже, чем асфальтобетонных заводов, однако они имеют постоянный характер и гораздо больший объем выбросов.

По обнаруженным концентрациям ПАУ в пробах промвыбросов были построены кривые (концентрационные профили), отражающие количественные соотношения между отдельными соединениями этой группы углеводородов. Некоторые из этих кривых представлены на рис. 1.

Видно, что для разных объектов конфигурация (профиль) полученных кривых является индивидуальной характеристикой. Так, профиль ПАУ в вы-

Диапазоны варьирования концентраций ПАУ в источниках выбросов, мкг/м³

Наименование ингредиента	Асфальтобетонные установки	Выбросы нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий	Выбросы линейно-перекачивающих станций	Выбросы производства пестицидов	Выбросы химического предприятия (неорганические)	Выбросы предприятий пищевой отрасли	Выбросы деревообрабатывающих предприятий	Металлургические предприятия	Предприятия теплоэнергетики
Нафталин	<0,005...5,607	<0,005...0,149	<0,005...0,819	<0,005	<0,005...1,13	0,033...3,356	<0,005...2,682	0,089...4,690	<0,005...2,735
Аценафтен	<0,005...0,023	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005...0,342	<0,005...0,008	<0,005...0,362	<0,005...1,418
Флуорен	0,105...0,610	<0,005...0,241	0,019...1,219	<0,005...0,231	0,005...0,98	<0,005...0,592	0,027...0,131	0,031...6,038	<0,005...0,202
Фенантрен	0,519...2,863	<0,005...1,304	0,116...5,160	<0,005...1,650	0,376...8,727	0,167...2,947	0,142...0,905	0,020...32,41	0,024...1,142
Антрацен	0,037...0,476	0,010...0,145	0,005...0,269	<0,005...0,079	0,020...0,255	0,014...0,402	0,008...0,094	0,014...9,992	<0,005...0,311
Флуорантен	0,599...2,735	<0,005...1,253	0,069...0,489	<0,005...0,191	0,061...1,611	0,023...0,778	<0,005...2,271	0,082...19,89	<0,005...0,677
Пирен	0,703...2,863	0,045...1,072	0,065...0,253	<0,005...0,077	<0,005...2,014	0,042...1,026	0,151...3,810	<0,005...0,215	<0,005...1,120
Бенз(<i>a</i>)антрацен	0,042...0,302	<0,005...0,017	0,005...0,511	<0,005...0,177	0,006...0,524	0,007...0,325	<0,005...0,367	0,022...5,826	<0,005...0,266
Хризен	0,120...0,593	<0,005...0,202	0,006...0,041	<0,005...0,023	0,002...0,121	0,003...0,177	<0,001...0,77	0,011...0,694	<0,005...0,608
Бенз(<i>b</i>)флуорантен	0,099...0,716	<0,001...0,225	0,008...0,296	<0,001...0,098	0,002...0,148	0,006...0,077	0,011...0,494	0,052...4,211	0,003...0,095
Бенз(<i>k</i>)флуорантен	0,034...0,316	<0,005...0,013	0,004...0,035	<0,001...0,014	0,001...0,054	0,003...0,033	0,004...0,235	0,015...1,766	0,001...0,022
Бенз(<i>a</i>)пирен	0,006...0,660	0,001...0,059	0,003...0,052	<0,001...0,019	<0,001...0,040	0,025...0,044	0,003...0,542	0,019...3,426	0,001...0,061
Дибенз(<i>a, h</i>)антрацен	<0,001...0,006	<0,001...0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001...0,181	<0,001...0,016
Бенз(<i>g, h, i</i>)перилен	<0,001...3,631	<0,001...0,012	0,007...0,126	<0,001...0,019	0,001...0,003	0,002...0,066	0,003...1,363	0,013...3,275	0,003...0,258
Индено(1,2,3- <i>c, d</i>)пирен	0,020...0,215	<0,001...0,011	<0,001...0,041	<0,001	<0,001	<0,001	0...0,103	0,008...2,158	<0,005

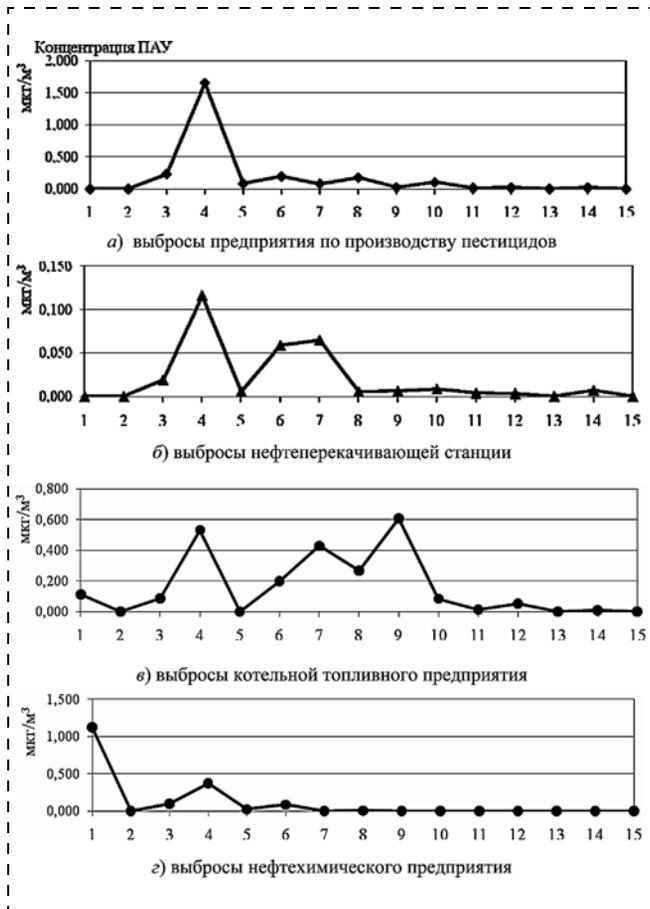


Рис. 1 Концентрационные профили полициклических ароматических углеводородов в промвыбросах различных предприятий:

1 — нафталин; 2 — аценафтен; 3 — флуорен; 4 — фенантрен, 5 — антрацен; 6 — флуорантен; 7 — пирен; 8 — бенз(а)антрацен; 9 — хризен; 10 — бенз(б)флуорантен; 11 — бенз(к)флуорантен; 12 — бенз(а)пирен; 13 — дибенз(а, h)антрацен; 14 — бенз(г, h, i)перилен; 15 — индено(1, 2, 3-с, d)пирен

бросах нефтехимического предприятия свидетельствует о том, что относительное содержание легких соединений существенно выше, чем в выбросах, например котельной. Таким образом, анализ полученных данных показывает, что соотношения концентраций ПАУ у каждого источника загрязнения отличаются. Поэтому сопоставление концентраций ПАУ в источниках эмиссии и окружающей среде может быть использовано для выявления причины загрязнения природного объекта.

Этот подход был использован при оценке воздействия выбросов котельной фанерного комбината, расположенного в непосредственной близости от жилой зоны. Были исследованы пробы промышленных выбросов, атмосферного воздуха и снегового покрова, поскольку одним из способов определения загрязненности воздуха является ис-

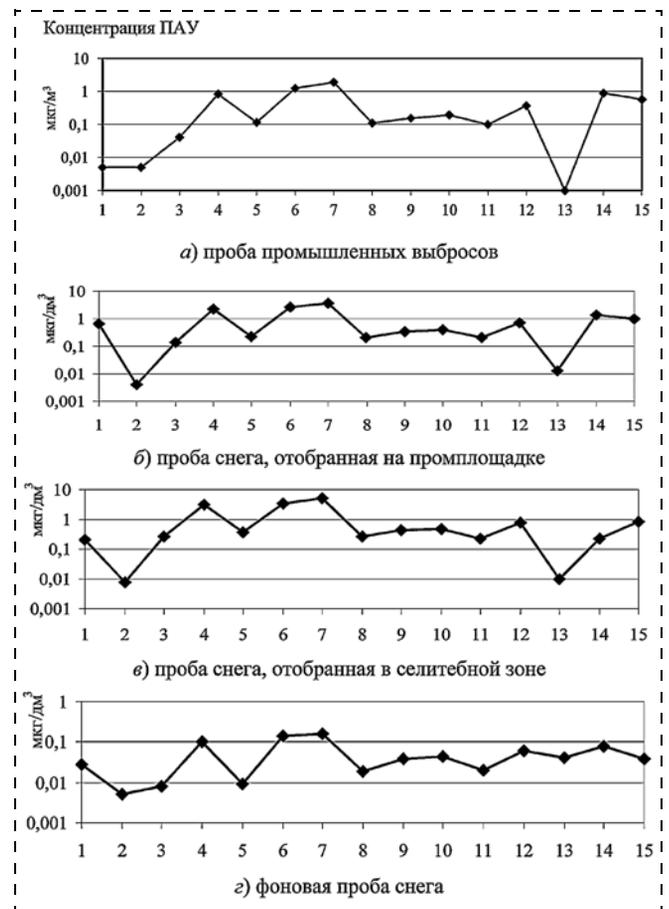


Рис. 2 Концентрационные профили ПАУ в промвыбросах и снеговом покрове:

1 — нафталин; 2 — аценафтен; 3 — флуорен; 4 — фенантрен; 5 — антрацен; 6 — флуорантен; 7 — пирен; 8 — бенз(а)антрацен; 9 — хризен; 10 — бенз(б)флуорантен; 11 — бенз(к)флуорантен; 12 — бенз(а)пирен; 13 — дибенз(а, h)антрацен; 14 — бенз(г, h, i)перилен; 15 — индено(1, 2, 3-с, d)пирен

следование депонирующих сред, контактирующих с ним.

Как известно, в снеговом покрове аккумулируются загрязняющие примеси из атмосферы в течение всего зимнего периода. Кроме того, состав снегового покрова отражает основные тенденции распределения загрязнения, что очень важно при необходимости определения источников эмиссии. Пробы отбирали на промплощадке предприятия, в непосредственной близости от источника поступления ПАУ в атмосферу (в районе трубы предприятия, по которой выбрасываются в атмосферу отходы сжигания углеводородного сырья) и в селитебной зоне. В качестве фоновой была выбрана точка, расположенная в парковой зоне. По полученным результатам построены кривые, представленные на рис. 2, из которого видно, что прослеживается закономерность в ходе кривых в ряду: источник эмиссии — компонент природной среды.

Несмотря на то, что содержание ПАУ в снеговых пробах, отобранных в селитебной зоне, ниже, чем в пробах, отобранных на промплощадке, их концентрационные профили схожи, т. е. соотношения между индивидуальными ПАУ при переходе от источника загрязнения к природному объекту сохраняются относительно постоянными.

В фоновой пробе концентрационный профиль ПАУ имеет иной характер. Полученные результаты свидетельствуют о едином характере загрязнения полициклическими ароматическими углеводородами снегового покрова на промплощадке предприятия и в селитебной зоне, и позволяют предположить негативное влияние промвыбросов исследуемого предприятия на окружающую среду.

Таким образом, при значительных локальных выбросах ПАУ в окружающую среду соотношения

концентраций между индивидуальными соединениями могут применяться для поиска источника загрязнения природной среды.

Список литературы

1. Крейнин Е. В., Михалина Е. С. Выбросы в атмосферу в электроэнергетике // Экология и промышленность России. — 2003. — № 2. — С. 22—21.
2. Шабад Л. М. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде. — М.: Медицина, 1973. — 300 с.
3. Ровинский Ф. Я., Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 222 с.
4. Руководство по контролю загрязнения атмосферы РД 52.04.189—89. — Л.: Гидрометеиздат. — 1991. — 693 с.
5. ПНД Ф 12.1.2—99 Методические рекомендации по отбору проб при определении концентраций взвешенных частиц (пыли) в выбросах промышленных предприятий. М. — 1999. — 29 с.

R. M. Khatmullina, Head of Division, V. I. Safarova, Head of Department, e-mail: guugak@mail.ru, State Analytical Control Department, Ufa, A. M. Safarov, Senior Lecturer, Ufa State Petroleum Technological University

Emission of the Polycyclic Aromatic Hydrocarbons into the Environment

The research was conducted of concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in the emission sources of different industrial facilities and thermal power plants. It was established, that PAH are present in the emissions of all surveyed, in this study, enter-prises. Concentration of benz(a)pyrene (indicator compound) ranges between $<0,001...3,426$ ppb/m³. The maximum concentrations of PAH are detected in emissions of coating plants. Concentration profiles are constructed on concentrations of PAH in emissions of surveyed facilities. It was revealed that for different emission sources configuration of these curves is an individual property. Detected a change in the pattern of concentration profiles in the series: emissions source — the environment. It was shown that the possibility of using the concentration profiles with considerable local emissions of PAH into the environment for the search for the source of their emission.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), benz(a)pyrene, the industrial chimney gases, concentration profiles, the clean air, the source of contamination

References

1. Kreinin E. V., Mikhailina E. S. Vybrosy v atmosferu v elektroenergetike. *Ekologia i promyshlennost' Rossii*. 2003. N. 2. P. 22—27.
2. Shabad L. M. O tsirkuljatsii kantserogenov v okrugaiushchei srede. M.: Meditsina, 1973. 300 s
3. Rovinskii F. Ia., Teplitskaia T. A., Alekseeva T. A. Fonovyi monitoring politsiklicheskich aromatcheskich uglevodorodov. L.: Gidrometeoizdat, 1988. 222 p.
4. Rukovodstvo po kontoliju zagriazneniia atmosfery RD 52.04.189—89. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 693 p.
5. PND F 12.1.2—99 Metodicheskie ukazaniia po otboru prob pri opredelenii konsentratsii vzveshennykh chastits (pyli) v vybrosakh promyshlennykh predpriatii. M., 1999. 29 p.



УДК 504.5:665.7.033.25

Джамиль А. К. М. Рахман¹, асп., Л. И. Кантор², канд. техн. наук, технический директор, Е. В. Дружинская¹, ст. препод., Е. А. Кантор¹, д-р хим. наук, проф., зав. кафедрой, e-mail: evgkantor@mail.ru,

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,

² Муниципальное унитарное предприятие "Уфаводоканал"

Мониторинг содержания бенз(а)пирена в 2001—2012 годах в створах реки Уфы

Проведен анализ результатов определения содержания бенз(а)пирена в воде трех створов водоисточника (реки Уфа) по данным за 2001—2012 гг. с применением сезонной декомпозиции временного ряда. Установлено, что случайная компонента временного ряда составляет 85...86 %. Использована аддитивная модель, для выделения сезонной составляющей применен метод скользящих средних. Вычислены сезонные индексы. Выявлено, что возможно использование линейных уравнений для расчета таких параметров, как концентрации Б(а)П, сезонные индексы и скользящие средние при переходе от одного створа к другому.

Ключевые слова: бенз(а)пирен, временной ряд, корреляционный анализ, мониторинг, сезонный индекс, скользящее среднее

Определение экологического состояния водоисточников — одна из наиболее важных задач охраны окружающей среды. Особенную сложность для мониторинга представляют "глобальные" загрязняющие вещества, к которым относится бенз(а)пирен (Б(а)П). Низкие концентрации Б(а)П и многочисленность источников его поступления в атмосферу, почву и водную среду создают дополнительные сложности при выявлении основных путей его миграции. Например, имеются данные о возможности образования Б(а)П при естественных процессах, протекающих в природе, — извержениях вулканов, лесных пожарах, миграции из газонефтяных месторождений и гидротермальных источников, биосинтезе растениями. Однако в основном Б(а)П поступает в окружающую среду в результате хозяйственной деятельности человека, поскольку он образуется при сжигании различных видов топлива на промышленных предприятиях, ТЭЦ, в котельных, на автомобильном транспорте и т.д. [1, 2].

Таким образом, загрязнение окружающей среды Б(а)П обусловлено различными факторами: *постоянными, циклическими, сезонными и случайными*. Постоянно действующие факторы представляют собой долговременные источники эмиссии Б(а)П (электростанции, промышленные печи, котельные установки промышленных и коммунально-бытовых предприятий, мусоросжигательные установки, выхлопные газы автотранспорта). Сезонность обеспечивается изменением концентраций загрязняющих веществ в атмосфере, поступлением в водоисточники ливневых и талых вод, несущих накопленный в почве и снежном покрове

Б(а)П, влиянием судоходства. К случайным факторам относятся аварийные загрязнения окружающей среды Б(а)П: выделение его в атмосферу и сбросы в водоисточники (пожары на угольных шахтах и нефтепромыслах, сбросы подсланевых (льальных) вод судоходного транспорта, влияние метеорологических условий).

В настоящее время содержание Б(а)П в окружающей среде может быть установлено с помощью методов аналитического контроля. Результаты измерения концентраций Б(а)П через определенные промежутки времени можно рассматривать как значения некоторого протекающего во времени процесса, а всю последовательность значений — как временной ряд, что позволяет использовать теорию анализа временных рядов для оценки основных факторов, обуславливающих содержание Б(а)П в водоисточнике [3].

Объекты и методы исследования

Основным водоисточником г. Уфы является река Уфа, на которой расположено три водозабора. В створах этих водозаборов ежемесячно производится отбор проб воды с целью определения содержания бенз(а)пирена. Анализ выполняется в МУП "Уфаводоканал" по методике МП УВК 1.69—2013, основанной на методике US EPA [4]. Следует отметить, что первый створ расположен до промышленной зоны и севернее городского массива. Второй створ расположен ниже по течению реки. С учетом течения с севера на юг этот створ может быть подвержен загрязнению со стороны промышленной зоны. Третий створ распо-

ложен южнее второго и загрязненность воды в этом месте возможна не только со стороны промышленной зоны, но и со стороны городского массива.

Данные контроля содержания бенз(а)пирена в створах реки Уфа представлены временными рядами с ежемесячными значениями его концентраций. Для выделения детерминированных составляющих применена аддитивная модель [3, 5–7]:

$$x_t = d_t + e_t; \quad (1)$$

$$d_t = tr_t + c_t + s_t, \quad (2)$$

где x_t — элементы временного ряда; d_t — детерминированная составляющая; e_t — случайная составляющая; $t = 1, \dots, n$ — порядковые номера элементов временного ряда; tr_t — трендовая компонента (закономерность процесса); c_t — циклическая компонента (периодическая составляющая); s_t — сезонная компонента (влияние времени года на поведение ряда).

Ввиду того, что циклическая компонента c_t в работе не исследуется (т. е. не выделяется отдельно, а включается в тренд), в дальнейшем детерминированная компонента будет представлять собой сумму трендциклической (tc_t) и сезонной компоненты.

Так как во временном ряду присутствует не только тренд, но и циклическая компонента, а характер тренда неясен, для сезонной декомпозиции использован метод скользящих средних. Интервал сглаживания принят равным $2m = 12$ (по числу месяцев в году). В качестве трендциклической компоненты рассмотрено скользящее среднее, определенное по формуле:

$$\bar{x}_t = \frac{1}{2m} \left(\frac{1}{2} x_{t-m} + x_{t-m+1} + \dots + x_{t+m-1} + \frac{1}{2} x_{t+m} \right), \quad (3)$$

где \bar{x}_t — простое арифметическое скользящее среднее для $t = m + 1, m + 2, \dots, n - m$.

Для оценки сезонных компонент составлен ряд из полученных скользящих средних с началом нумерации с единицы: $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{n-2m}$, где $n - 2m$ — общая длина ряда средних. Соответственно изменена нумерация исходного ряда так, чтобы каждому \bar{x}_t соответствовал член x_t . При этом отброшены первые и последние $p/2$ члены исходного ряда, для которых значения скользящего среднего по формуле (3) не могут быть вычислены. Здесь p — период последовательности s_t , так что $s_t = s_{t+p}$ для всякого t . Значение p принято равным $2m = 12$ (по числу месяцев в году).

Оценка сезонной составляющей проведена по формуле:

$$\bar{s}_i = \frac{1}{k+1} \sum_{j=1}^{k+1} (x_{i+jp} - \bar{x}_{i+jp}),$$

где k определено из формулы общей длины исходного ряда $n = (k + 2)p$.

Таким образом, для каждого месяца $i, 1 \leq i \leq p$, получены разности

$$x_i - \bar{x}_i, x_{i+p} - \bar{x}_{i+p}, \dots, x_{i+kp} - \bar{x}_{i+kp},$$

где $i = 1, \dots, p$.

В исследуемом случае $k = 10$. Тогда

$$\bar{s}_i = \frac{1}{11} \sum_{j=1}^{k+1} (x_{i+jp} - \bar{x}_{i+jp}). \quad (4)$$

Для расчета концентраций Б(а)П и параметров временных рядов использованы линейные уравнения вида:

$$y_i = Ky_j + b, \quad (5)$$

где y — концентрация Б(а)П либо скользящее среднее, либо сезонные индексы; i, j — номера створов; K и b — коэффициенты линейного уравнения.

Обсуждение результатов

Ранее проведенный анализ временных рядов содержания Б(а)П в воде трех створов реки Уфа [8, 9] позволил сопоставить параметры, полученные в результате обработки временных периодов 1995–2003 гг., 2004–2012 гг. и 1995–2012 гг. с использованием различных моделей (аддитивной и мультипликативной) и вариантов сглаживания (среднегодовые, средние многолетние, скользящие средние). Результаты сопоставления параметров свидетельствуют о некоторых их отличиях. С помощью корреляционного анализа удалось установить, что более тесные связи характеризуют различные створы, если рассматривать период 2004–2012 гг., а расширение временного ряда на весь период наблюдений приводит к уменьшению коэффициентов корреляции между параметрами временных рядов. Причиной этому служит то, что период 1995–2003 гг. характеризуется значительным числом случаев с высоким уровнем концентраций Б(а)П, в 5–10 раз превосходящим появление повышенных концентраций в период 2004–2012 гг. Средние многолетние (СМ) показатели для периода 1995–2003 гг., более чем в 2 раза превышает этот показатель для периода 2004–2012 гг. Еще в большей степени разнятся значения максимальных концентраций (табл. 1).



Таблица 1

Некоторые характеристики содержание Б(а)П в различные временные периоды, нг/дм³

Показатель	1995—2003 гг.			2004—2012 гг.			1995—2012 гг.			2001—2012 гг.		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Створ												
Max	5,40	8,70	5,90	1,10	0,81	1,62	5,40	8,70	5,90	1,25	1,21	1,62
СМ	0,64	0,72	0,76	0,26	0,26	0,33	0,45	0,49	0,54	0,28	0,28	0,35

Возможно, что причиной различия характеристик периодов 1995—2003 и 2004—2012 гг. служат такие факторы, как снижение судоходства по реке Уфа, изменение структуры и совершенствование технологии на предприятиях топливно-энергетического комплекса (ТЭК), изменение основных направлений движения автотранспорта и загруженности транспортных магистралей. Эти факторы являются долговременными и, как показано ранее, играют заметную роль в загрязнении бенз(а)пиреном реки Уфа [10]. Таким образом, модели, описывающие период 1995—2012 гг., в меньшей степени соответствуют закономерностям, формирующимся в последние годы. В этой связи представляется целесообразным проанализировать состояние водоисточника за последние 12 лет, которые характеризуются достаточно стабильным влиянием различных факторов на качество воды (рис. 1).

Ранее [1, 2] рассмотрена возможность анализа состояния водоисточника в отношении Б(а)П с использованием различных вариантов моделирования (мультипликативная и аддитивная модели) и вариантов сглаживания (скользящие средние, среднегодовые, средние многолетние). Выявлено, что принципиальных преимуществ ни один из вариантов моделей перед другими не имеет. Тем не менее несколько более значимыми представляются результаты с использованием скользящих средних (СС), поскольку в этом случае появляется возможность более подробного анализа, например сопоставления величин обработанных временных рядов в различные месяцы и годы. В этой связи проведена обработка временного ряда содержания Б(а)П за период 2001—2012 гг. с использованием аддитивной модели и сглаживания в виде скользящих средних.

Таблица 2

Значения вклада составляющих временного ряда в содержание Б(а)П в воде створов 1—3 реки Уфа

Составляющие	Вклад компонента, %		
	Створ 1	Створ 2	Створ 3
Детерминированная	14	15	14
Случайная	86	85	86

В исследуемый период 2001—2012 гг. все створы характеризуются вне зависимости от выбора модели высокой величиной случайной составляющей, которая лежит в пределах 85...86 % (табл. 2).

Результаты обработки временных рядов содержания Б(а)П свидетельствуют об аналогичности зависимости изменения сглаженных концентраций Б(а)П в различных створах как за весь период, так и годовом периоде (рис. 2). Следует отметить, что за весь период наблюдений по величине среднегодовых концентраций Б(а)П в большей степени загрязненным является створ 3, загрязненность створов 1 и 2 между собой различается незначительно, но заметно уступает загрязненности створа 3.

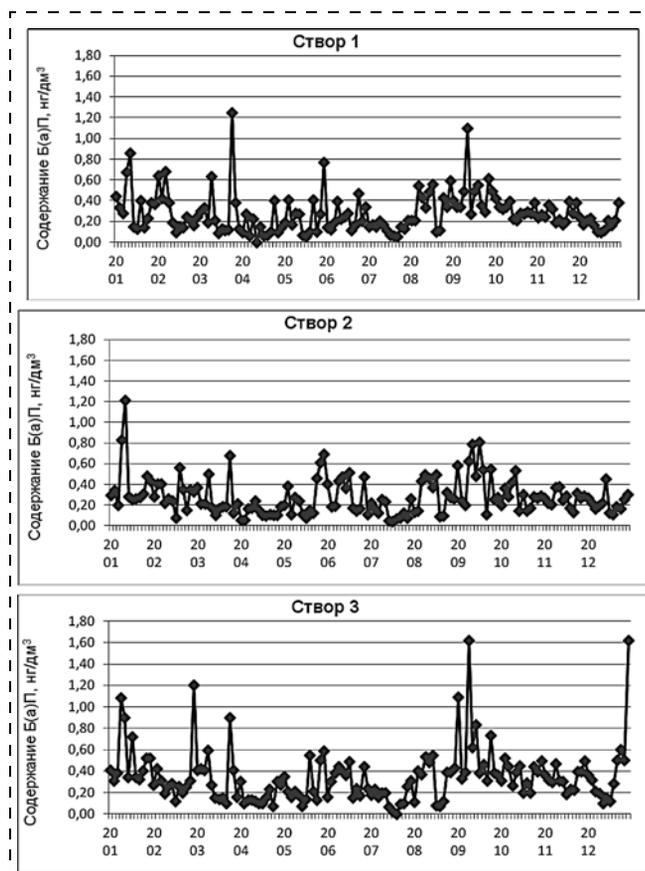


Рис. 1. Временные ряды содержания Б(а)П в створах реки Уфа в период 2001—2012 гг.



Рис. 2. Изменение скользящих средних содержания Б(а)П в створах реки Уфа в 2001–2012 гг. (а) и годовом периоде (б)

Сопоставление между скользящими средними содержания Б(а)П показывает, что связи между этими величинами выражены как сильная и весьма сильная (табл. 3), поскольку коэффициенты корреляции (r) превышают 0,88, в то время как сопоставление концентраций не позволяет получить коэффициенты корреляции более 0,7, что соответствует заметной корреляции [11].

Интересно отметить, что сезонные индексы характеризуются повышенными значениями не только в весенний и осенний паводковые периоды (апрель—май и октябрь), но и в зимний период (декабрь) (рис. 3).

По всей вероятности в паводковые периоды повышение концентрации Б(а)П связано со смывами с почвы. Высокое содержание в декабре возможно обеспечивается поступлением Б(а)П с грунтовыми водами, которые разгружаются в русло реки.

Значения коэффициентов корреляции (табл. 4), характеризующие связь между сезонными индексами в различных створах (0,65...0,85), свидетельствуют о возможности вычисления этих парамет-

Таблица 3

Параметры линейных уравнений связи между концентрациями Б(а)П и скользящими средними временных рядов в различных створах

Показатель	Створы	K	b	R^2	r
Концентрация	Створ 2/Створ 1	0,63	0,10	0,44	0,67
	Створ 3/Створ 1	0,65	0,17	0,24	0,49
	Створ 3/Створ 2	0,81	0,12	0,33	0,58
Скользящие средние	Створ 2/Створ 1	0,85	0,04	0,78	0,88
	Створ 3/Створ 1	1,18	0,00	0,84	0,91
	Створ 3/Створ 2	1,22	-0,01	0,84	0,91

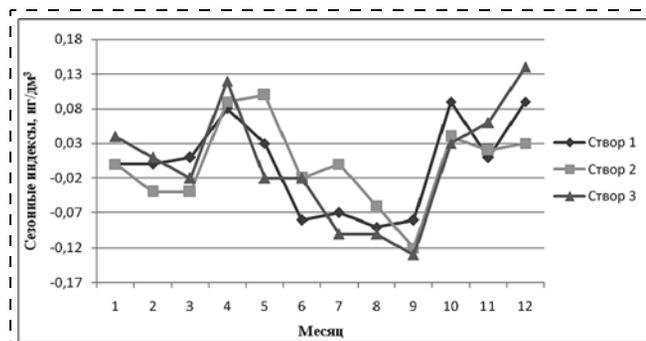


Рис. 3. Сезонные индексы

ров временного ряда в других створах по экспериментально определенным значениям в одном из них. Следует также отметить, что свободным членом уравнения (5) можно пренебречь ($b = 0$).

Наиболее удобно при моделировании содержания Б(а)П, скользящих средних и сезонных индексов при переходе от одного створа к другому использовать линейные уравнения:

$$x_2 = 0,63x_1 + 0,10 \quad R^2 = 0,44 \quad r = 0,67$$

$$x_3 = 0,65x_1 + 0,17 \quad R^2 = 0,24 \quad r = 0,49$$

$$x_3 = 0,81x_2 + 0,12 \quad R^2 = 0,33 \quad r = 0,58$$

Таблица 4

Результаты поиска связи между величинами сезонных индексов в различных створах

Створы	K	b	R^2	r
Створ 2/Створ 1	0,66	0,00	0,51	0,72
Створ 3/Створ 1	1,07	0,00	0,72	0,85
Створ 3/Створ 2	0,89	0,00	0,43	0,65



$$\begin{aligned}tc_2 &= 0,85tc_1 + 0,04 & R^2 &= 0,78 & r &= 0,88 \\tc_3 &= 1,18tc_1 + 0,00 & R^2 &= 0,84 & r &= 0,91 \\tc_3 &= 1,22tc_2 - 0,01 & R^2 &= 0,84 & r &= 0,91 \\s_2 &= 0,66s_1 & R^2 &= 0,51 & r &= 0,72 \\s_3 &= 1,07s_1 & R^2 &= 0,72 & r &= 0,85 \\s_3 &= 0,89s_2 & R^2 &= 0,43 & r &= 0,65,\end{aligned}$$

где x_1, x_2, x_3 — значение концентрации Б(а)П в створах 1–3 соответственно; tc_1, tc_2, tc_3 — значение скользящих средних временных рядов содержания Б(а)П в створах 1–3 соответственно; s_1, s_2, s_3 — значение сезонных индексов временных рядов содержания Б(а)П в створах 1–3 соответственно; R^2 — коэффициент детерминации; r — коэффициент корреляции.

Таким образом, несмотря на высокий вклад случайной величины (более 80 %) в значении временного ряда концентрации Б(а)П в воде водоемочника, полученные результаты свидетельствуют о возможности расчета с использованием линейных уравнений таких параметров, как концентрации Б(а)П, сезонные индексы и скользящие средние при переходе от одного створа к другому.

Список литературы

1. Ильницкий А. П., Королев А. А., Худолей В. В. Канцерогенные вещества в водной среде. — М.: Наука, 1993. — 222 с.
2. Суздорф А. Р., Морозов С. В., Кузубова Л. И. и др. // Химия в интересах устойчивого развития. — 1994. — № 2. — С. 511.

3. Кантор Л. И., Шемагонова Е. В. Анализ временных рядов загрязнения бенз(а)пиреном воды в р. Уфе // Водные ресурсы. — 2002. — № 6. — С. 743.
4. US EPA. Methods for determination of organic compounds in drinking water. Method 550.1 "Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water by liquid-solid extraction and HPLC with coupled ultraviolet and fluorescence detection", 1990, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio 45268. <https://www.o2si.com/docs/epa-method-550.1.pdf>
5. Тюрин Ю. Н., Макаров А. А. Анализ данных на компьютере. // Изд. 3-е, перераб. и доп. / Под ред. В. Э. Фигурнова. — М.: ИНФРА-М, — 2002. — 528 с.
6. Gould P. G., Koehler A. B., Ord, J. K., Snyder R. D., Hyndman R. J., Vahid-Araghi F. Forecasting Time Series With Multiple Seasonal Patterns // European Journal of Operational Research, — 2008. — Vol. 191. — № 1. — P. 207–222.
7. Paul L. Anderson, Mark M. Meerschaert, Kai Zhang. Forecasting with prediction intervals for periodic autoregressive moving average models // Journal of Time Series Analysis. — 2013. — Vol. 34. — N 2. — P. 187–193.
8. Рахман Джамиль А. К. М., Кантор Л. И., Дружинская Е. В., Кантор Е. А. Мониторинг бенз(а)пирена в водных объектах. Сообщение I. Мониторинг содержания бенз(а)пирена в 1995–2003 гг. в створах, расположенных на р. Уфа // Башкирский химический журнал. — 2013. — Т. 20. — № 4. — С. 113–118.
9. Рахман Джамиль А. К. М., Кантор Л. И., Дружинская Е. В., Кантор Е. А. Мониторинг бенз(а)пирена в водных объектах. Сообщение II. Особенности результата мониторинга содержания бенз(а)пирена в створах р. Уфа в 2004–2012 гг. // Башкирский химический журнал. — 2014. — Т. 21. — № 1. — С. 67–72.
10. Кантор Л. И., Шемагонова Е. В., Кантор Е. А. Некоторые источники бенз(а)пирена, влияющие на его содержание в водном объекте (на примере р. Уфы) // Вода и экология: проблемы и решения. — 2002. — № 4 (13). — С. 60–64.
11. Якушев А. А., Горбатков С. А., Габдрахманова Н. Т. Многомерные статистические методы и нейросетевые модели в экономическом анализе. — Уфа: Издательский центр "Башкирский территориальный институт профессиональных бухгалтеров". — 2001. — 280 с.

Jamil A. K. M. Rahman¹, Postgraduate Student, **L. I. Kantor**², Technical Director, **E. V. Druzhinskaya**¹, Senior Lecturer, **E. A. Kantor**¹, Professor, Head of Chair, e-mail: evgkantor@mail.ru,

¹ Ufa State Petroleum Technological University

² Ufavodokanal Municipal Unitary Enterprise

Monitoring of Benz(a)pyrene in 2001–2012 at Cross-Sections Situated on the Ufa River

This article examines the analysis of the results that determine the concentration of benz(a)pyrene in water at three different cross-sections situated along the Ufa River using seasonal decomposition of the time series according to the measurement data gathered between years 2001 and 2012. It is established that the random component of the time series is 85–86 %. Additive model is used; values of the moving average method are used to isolate the seasonal component. Seasonal indices are calculated. It is revealed that the use of linear equations is possible to calculate parameters such as the concentration of B(a)P, seasonal indices and moving averages during the transition from one cross-section to another.

Keywords: benz(a)pyrene, correlation analysis, monitoring, moving average, seasonal indices, time series analysis

References

1. Ил'ник А. П., Королев А. А., Худолев В. В. Кancerогенные вешества в водной среде. М.: Наука, 1993. 222 p.
2. Suzdorf A. R., Morozov S. V., Kuzubova L. I. i dr. *Himija v interesah ustojchivogo razvitiya*. 1994. N. 2. P. 511.
3. Kantor L. I., Shemagonova E. V. Analiz vremennyh rjadov zagrazneniya benz(a)pirenom vody v r. Ufe. *Vodnye resursy*. 2002. N. 6. P. 743.
4. US EPA. Method 550 "Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water by liquid-solid extraction and HPLC with coupled ultraviolet and fluorescence detection. Methods for determination of organic compounds in drinking water", 1990, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio 45268. <https://www.o2si.com/docs/epa-method-550.1.pdf>
5. Tjurin Ju. N., Makarov A. A. Analiz dannyh na komp'yutere. Izd. 3-e, pererab. i dop. / Pod red. V. Je. Figurnova. M.: INFRA-M, 2002. 528 p.
6. Gould P. G., Koehler A. B., Ord J. K., Snyder R. D., Hyndman R. J., Vahid-Araghi, F. Forecasting Time Series With Multiple Seasonal Patterns. *European Journal of Operational Research*. 2008. V. 191. N. 1. P. 207–222.
7. Paul L. Anderson, Mark M. Meerschaert, Kai Zhang. Forecasting with prediction intervals for periodic autoregressive moving average models. *Journal of Time Series Analysis*. 2013. V. 34. N. 2. P. 187–193.
8. Rahman Jamil A. K. M., Kantor L. I., Druzhinskaja E. V., Kantor E. A. Monitoring benz(a)pirena v vodnyh obektah. Soobshhenie I. Monitoring sodержaniya benz(a)pirena v 1995–2003 gg. v stvorah raspolozhennyh na r. Ufa. *Bashkirskij himicheskij zhurnal*. 2013. V. 20. N. 4. P. 113–118.
9. Rahman Jamil A. K. M., Kantor L. I., Druzhinskaja E. V., Kantor E. A. Monitoring benz(a)pirena v vodnyh obektah. Soobshhenie II. Osobennosti rezul'tata monitoringa sodержaniya benz(a)pirena v stvorah r. Ufa v 2004–2012 gg. *Bashkirskij himicheskij zhurnal*. 2014. V. 21. N. 1. P. 67–72.
10. Kantor L. I., Shemagonova E. V., Kantor E. A. Nekotorye istochniki benz(a)pirena, vlijajushhie na ego sodержanie v vodnom objekte (na primere r. Ufy). *Voda i jekologija: problemy i reshenija*. 2002. N. 4 (13). P. 60–64.
11. Jakushev A. A., Gorbatkov S. A., Gabdrahmanova N. T. Mnogomernye statisticheskie metody i nejrosetevye modeli v jekonomicheskom analize. Ufa: Izdatelskij centr "Bashkirskij territorialnyj institut professionalnyh buhgalterov", 2001. 280 p.

УДК 504.064.36

Т. П. Смирнова, канд. хим. наук, зам. начальника отдела,
Т. Н. Михеева, начальник отдела, **А. П. Ступин**, начальник отдела,
А. Т. Магасумова, канд. хим. наук, начальник отдела,
Г. Ф. Шайдулина, канд. техн. наук, начальник аналитической службы,
В. И. Сафарова, д-р хим. наук, начальник Управления, e-mail: ugak@bashnet.ru,
Управление государственного аналитического контроля, Уфа,
Р. С. Кузьмин, асп., Институт экологии и географии Казанского (Приволжского) федерального университета

Исследование хронического токсического действия модельных растворов мышьяка с использованием объектов фито- и зоопланктона

В статье опубликованы результаты определения плодовитости низших ракообразных *Daphnia magna* и прироста клеток водорослей *Scenedesmus quadricauda* — стандартных тест-объектов, используемых для биотестирования. Показано достоверное снижение плодовитости *Daphnia magna* при концентрации мышьяка $1...10 \text{ мкг/дм}^3$ в модельном растворе и усиление роста клеток *Scenedesmus quadricauda* при различных концентрациях As (III) . Полученные данные обсуждены с точки зрения нормирования мышьяка в воде водоемов различного назначения. Обобщен материал по содержанию мышьяка в воде и донных отложениях рек, озер, прибрежных морских акваторий в России, европейских странах, США и Японии, а также в сырье и отходах горнорудных предприятий Южного Урала. Показана необходимость разработки экологических нормативов для соединений мышьяка и других элементов с переменной валентностью в компонентах окружающей среды. Это крайне важно для сохранения биологического разнообразия природных экосистем, особенно малых рек в зонах разработки мышьяковистых руд.

Ключевые слова: биотестирование, определение хронической токсичности, мышьяк, горно-обогатительные комбинаты, малые реки, экологическое нормирование, полиметаллические руды, донные отложения, экологический мониторинг



Компоненты геологической среды в районе расположения месторождений полиметаллических руд характеризуются повышенными и нередко аномальными содержаниями некоторых токсичных элементов (Cu, Zn, Pb, As, Sb, Hg и др.). Среди перечисленных элементов важное значение имеет мышьяк.

В юго-восточных районах Республики Башкортостан (Южный Урал), где функционируют крупные промышленные предприятия по добыче и переработке сульфидных руд цветных металлов, существуют геохимические предпосылки повышенного содержания мышьяка в объектах окружающей среды [1]. В состав добываемых руд входит арсенопирит (мышьяковистый колчедан), поэтому их переработка сопровождается увеличением поступления соединений мышьяка в окружающую среду, в том числе в поверхностные водные объекты с образованием зон с повышенным содержанием этого элемента в воде, донных отложениях и гидробионтах.

Мышьяк является высокотоксичным кумулятивным протоплазматическим ядом, поражающим нервную систему человека [2]. Для водной биоты мышьяк также токсичен. Отмечено накопление As морскими промысловыми организмами до высоких концентраций, негативно влияющих на их существование и исключающих возможность использования в пищу [3]. Среднее содержание As в двустворчатых моллюсках составляет 15 мкг/г сухой массы, в мидиях — 0,46 мг/г.

Мышьяк относится к рассеянным элементам, присутствующим во всех компонентах окружающей среды, который в естественных условиях не накапливается в воздушной, водной и биологической сферах. В то же время указывается на потенциальную опасность отравления питьевой водой с большой концентрацией As (III) (арсенидов) [4], характерной для поверхностных и подземных вод в районе полиметаллических месторождений.

Имеются три основных типа геологических условий, приводящих к повышению концентрации мышьяка в подземных водах: водоносные слои, образованные породами, богатыми мышьяксодержащими сульфидными минералами; водоносные слои, содержащие осадочные породы, покрытые гидрооксидом железа, обогащенные мышьяком гидрологического происхождения, откуда мышьяк мобилизуется в просачивающуюся воду в восстановительных условиях; водоносные слои, обогащенные мышьяком вследствие высокой скорости испарения в засушливых зонах, что приводит к повышению концентрации в воде щелочных и щелочноземельных металлов и ускоренной мобилизации мышьяка при $pH > 8,5$ [4].

Таблица 1

Содержание мышьяка в пресных водах по экспериментальным и литературным данным [4]

Место извлечения проб	Содержание As, мкг/дм ³
Бывший СССР (реки, озера)	0,3...6,3
США (реки, озера)	0,1...1100
Япония (реки, озера)	0,16...7,7
ФРГ (реки)	3,6
Эльба	20...25
Рейн	1...15
Рур	2...15
Везер	2...7
Шпрее	3...4
Дунай	2...3
Швеция (реки)	0,2...0,4
Англия	Следы
Норвегия	0,26
Италия	0,2...0,4
Россия (РБ, р. Клы, оз. Мисели)*	10

* Данные проведенного авторами мониторинга природных сред.

Содержание мышьяка в гидросфере значительно ниже, чем в литосфере. Среднее количество его в морской воде составляет 2...3 мкг/дм³. В устьях рек концентрация мышьяка увеличивается в воде за счет частиц ила, увлекаемого речными потоками. Пресноводные бассейны отличаются большим разбросом концентраций мышьяка, данные о содержании которого в пресных водах представлены в табл. 1.

Для водных экосистем круговорот мышьяка описан применительно к озерам. Он осуществляется за счет протекания реакций окисления—восстановления, биометилирования, лигандного обмена, адсорбции, осаждения.

В поверхностном слое, насыщенном кислородом, идет процесс окисления, в нижних слоях процесс восстановления, а при наличии соединений восстановленной серы — процесс образования серосодержащих соединений мышьяка. В результате адсорбции соединений As (V) (арсената) оксидами железа и алюминия, образования сульфидов, мышьяк концентрируется в осадке, а его содержание в воде значительно снижается. При этом возможен также обратный процесс — десорбция и растворение мышьяка в растворе. В данном цикле определяющим механизмом выведения мышьяка из водной среды является его взаимодействие с гидрооксидом железа.

Содержание мышьяка в донных отложениях может быть рассмотрено на примере исследований, проведенных в Амурском заливе [3]. Средняя концентрация As в глинистых илах Мирового океана составляет 13 мкг/г. Концентрация As в

донных отложениях залива Петра Великого находится на уровне, известном для илов из других областей Мирового океана. Наибольшее содержание элементов приурочено к отдельным районам. Так, в Амурском заливе в бухте Золотой Рог концентрация As в 10 раз превышала его содержание на фоновой станции. Известно, что источником загрязнения данной акватории являются крупнейшие промышленные предприятия, расположенные на берегу бухты, а также г. Владивосток. Содержание As в грунтах западного входного мыса бухты Золотой Рог — мыса Токаревского было в 3 раза выше его фоновых концентраций, что отражает значительное антропогенное влияние на данную акваторию.

Выявлен район в прибрежье северного Приморья — бухта Рудная — с многократно повышенным уровнем содержания As в донных отложениях (в 24—184 раз относительно фоновых концентраций). Такое содержание элемента в грунтах обусловлено стоками горнорудных и горно-химических производств Дальнегорского района [3]. Диапазоны концентраций кислоторастворимых форм As в донных отложениях прибрежных акваторий Приморья представлены в табл. 2.

Рудные месторождения, разрабатываемые в долине реки Рудной, впадающей в бухту, характеризуются комплексом из более чем 30 минералов, в их числе арсенопирит — минерал класса сульфидов (FeAsS) [5]. Вблизи рудных тел формируются геохимические аномалии, но концентрации металлов в них невысокие и не меняют качества воды коренным образом. Однако ввод месторождений в эксплуатацию приводит к резкому увеличению поступления микроэлементов в природные воды.

Таблица 2
Диапазоны концентраций As в донных отложениях, мкг/г сухой массы [3]

Район отбора проб	Дата отбора	Диапазон
Залив Находка	Сентябрь 1998, 1999	1,63...10,02
Славянский залив	Июль 2000, 2001	1,60...4,75
Бухта Золотой Рог	Сентябрь 1998, 2001	23...25,40
Амурский залив	Июнь 2001	0,22...6,4
О-ва Рейнеке (фон)	Сентябрь 1998, май, июль 2000, 2001	1,98...2,2
Ю.-З. часть Амурского залива	Июнь 2001	1,00...1,9
Северное Приморье Бухта Рудная Бухта Киевка	Июль, август, сентябрь 1999, август 2000	52,50...405,00 1,63...3,90

Содержание мышьяка в техногенных и природно-техногенных компонентах в долине реки повышено [3].

В Северном Приморье мышьяк поступает в прибрежные морские воды путем вымывания его атмосферными осадками с открытых поверхностей горных выработок. Диапазоны концентраций мышьяка в различных водорослях составляют для бурых водорослей 10,1...49,9 мкг/г сухой массы, для зеленых водорослей 4,03 мкг/г сухой массы, в морских травах 12,71 мкг/г [6].

Таким образом, без очевидного влияния источников загрязнения содержание мышьяка в природных водах не превышает 10 мкг/дм³. Значительные концентрации его характерны для районов залежей полиметаллических руд и зон влияния предприятий по их переработке. Согласно данным работы [4] концентрация мышьяка в зонах сульфидной минерализации может составлять до 1000...5000 мкг/дм³.

В районе месторождений сульфидных полиметаллических руд в РБ мышьяк содержится в технологических средах, которые представлены: твердыми отходами добычи (внешние отвалы вскрышных, пустых пород и некондиционных руд) и переработки (хвосты флотации руд и неликвидный пиритный концентрат); жидкими отходами добычи (рудничные и подотвальные воды) и обогащения (фильтрат хвостохранилищ).

Необходимо отметить, что в результате антропогенной деятельности происходит изменение специфического облика геоэкологических условий в регионе. Процессы техногенеза приводят к формированию агрессивных сернокислых растворов с аномальными концентрациями типоморфных компонентов (Cu, Zn, Pb, As, Hg и др.). Геохимия и спектр токсикантов в компонентах окружающей среды юго-восточных районов РБ определяются макро- и микроэлементным составом рудовмещающих пород и руд месторождений (Учалинское, Сибайское, Бурибаевское и т. д.). Добываемые и перерабатываемые руды содержат высокие концентрации элементов (%), которые достигают: Cu — до 3,8, Zn — 4,2, Pb — 0,2, As — 0,3, Cd — 0,01, Tl — 0,014 и др. [1].

В подрудных толщах серицитизированных пород вблизи рудного тела Сибайского месторождения наблюдаются следующие содержания: цинка до 2 %, свинца до 0,058 %, мышьяка до 0,3 %, сурьмы до 0,02 %. Твердые отходы: внешние отвалы пустых пород и некондиционных руд, хвосты флотации руд, являются техногенно-минеральными образованиями с высоким содержанием типоморфных элементов. В них содержатся (%): Cu — до 0,7, Zn — до 0,6, Pb — до 0,01, As — до 0,02,



Таблица 3

Распределение мышьяка между продуктами металлургических производств, % [4]

Продукт	Производство	
	цинк	медь
Загружено		
Руда, концентраты	52,0	87,3
Оборотные промпродукты	48,0	12,7
Получено		
Товарная продукция	2,7	0,4
Промпродукты	54,4	9,4
Отвальные продукты	37,7	47,9
Газовые выбросы и сточные воды	0,4	41,9
Прочие продукты и неучтенные продукты	4,7	1,2

Hg — до 0,0007, Cd — до 0,06 и т. д. [1]. Одной из форм миграции токсикантов из техногенно-минеральных образований являются гидрогенные потоки (до 4,5 млн м³/год) в виде жидких производственных отходов (карьерные и шахтные воды, подотвальные воды, жидкая фаза материала хвостохранилищ).

По имеющимся литературным данным при пирометаллургической переработке различного сырья мышьяк распределяется по всем продуктам переработки: в цинковом производстве более половины поступившего мышьяка уходит в промпродукты, около 1/3 в отвальные продукты. Основными источниками мышьяка на ГОК являются хвостохранилища.

При производстве цинка и меди распределение мышьяка иллюстрируется данными, представленными в табл. 3. Из таблицы видно, что при производстве меди наибольший процент As приходится на отвальные продукты, газовые выбросы и сточные воды, и этот факт необходимо учитывать при проведении оценки влияния этих производств на объекты окружающей среды.

В настоящее время нормирование загрязняющих веществ в природных биоценозах базируется на санитарно-гигиенических принципах и нормах, т. е. на приоритетности защиты, прежде всего человека.

Однако остается открытым вопрос, всегда ли и в какой мере нормативы, установленные для человека, обеспечивают защиту других объектов живой природы. Безопасные для человека уровни загрязнения часто оказываются губительными для биоты. Под экологическим нормированием понимается совокупность методов решения проблем, связанных с определением нормы экосистем, изучением их антропогенных трансформаций и нахождением предельных величин нагрузок [7].

Согласно обобщенной оценке [6], чувствительность водной биоты к различным формам мышьяка широко варьирует в зависимости от многих биологических и абиотических факторов. Острые и хронические эффекты на организменном уровне выражались в летальности, подавлении роста, фотосинтеза и репродукции, а также изменении поведения. Отмечается, что загрязненная мышьяком среда характеризуется ограничением биологического разнообразия. При высоких уровнях загрязнения могут сохраниться только виды, отличающиеся резистентностью к мышьяку.

К примеру, в США существуют нормативы для водных объектов, используемых для водопользования и рыболовства, при этом одним из основных критериев нормирования является способность веществ к накоплению и аккумуляции в пищевых цепях (биоаккумуляция). В табл. 4 приведены примеры таких нормативов для мышьяка. В случае, если вещества способны к аккумуляции, то нормативы их содержания могут быть в тысячу и более раз ниже, чем ПДК для питьевой воды [8].

Актуальность исследования влияния соединений мышьяка на биологические объекты обусловлена спецификой его распределения на антропогенно-нагруженных территориях РБ в зоне функционирования горно-обогатительных комбинатов, в частности в поверхностных водных объектах.

На фоне большого числа работ, посвященных изучению содержания токсичных элементов в морских экосистемах, отсутствуют данные, отражающие концентрации соединений мышьяка в донных

Таблица 4

Максимальные допустимые концентрации веществ (мкг/дм³) в воде водных объектов (штат Вермонт, США), стандарты US EPA* и России для питьевой воды и водоемов рыбохозяйственного значения

Ингредиент	США (штат Вермонт) [8]		Россия				
	При потреблении		Стандарт для питьевой воды	При потреблении		Стандарт для питьевой воды	ПДК рыб.хоз.
	А	Б		А	Б		
Мышьяк	0,02	1,5	50	н/н	н/н	10	50

* US EPA — Агентство по охране окружающей среды США.

Примечание. А — вода + рыбопродукты; Б — только рыбопродукты, н/н — не нормируется.

Таблица 5

Определение токсического действия водного раствора, содержащего ионы мышьяка (III), а также в присутствии сульфид-иона, на водоросли *Scenedesmus quadricauda*

Концентрация, мкг/дм ³	Тест-объект	Показатель прироста клеток по отношению к контролю, %
1	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	100
10		202
100		77
10 (As ³⁺ +S ²⁻)		129

отложениях и промышленных гидробионтах пресноводных водоемов.

В связи с потенциальной возможностью загрязнения воды и донных отложений соединениями мышьяка малых рек, расположенных в зоне влияния предприятий цветной металлургии и опасностью этого элемента для биоты, нами была предпринята попытка оценить токсическое действие соединений мышьяка As (III) в условиях модельного эксперимента. Эксперимент заключался в определении хронического токсического действия на двух тест-объектах, рекомендованных к применению для целей экологического контроля.

Как видно из табл. 5, токсическое действие мышьяка, концентрация которого в водном растворе составляла от 1 мкг/дм³ до 100 мкг/дм³, в краткосрочном опыте на культуре водорослей *Scenedesmus quadricauda* не зафиксировано. Обнаружен прирост водоросли в исследуемых пробах, по сравнению с контролем, что говорит о том, что исследуемые растворы оказывают на культуру стимулирующее действие.

По результатам биотестирования установлено хроническое токсическое действие раствора, содержащего ион мышьяка (III) концентрацией 1 мкг/дм³, сульфид-иона 10 мкг/дм³, на тест-объект *Daphnia magna* (табл. 6), которое проявляется в снижении плодовитости используемого тест-объекта. Культивирование тест-объекта в водном растворе ион мышьяка (III) с концентрацией 100 мкг/дм³ наблюдалась гибель тест-объекта *Daphnia magna*.

Хроническое токсическое действие иона мышьяка (III) с концентрацией 10 мкг/дм³ и сульфид-иона 10 мкг/дм³ при совместном присутствии в водном растворе не вызывает отклонений в плодовитости и гибели *Daphnia magna*.

Из табл. 6 видно, что обнаружены достоверные отклонения по показателю плодовитости *Daphnia magna* в модельных растворах ион мышьяка (III) с концентрацией 1...100 мкг/дм³. Таким образом, для зоопланктона исследованная концентрация не является безопасной, в связи с тем, что вызывает неблагоприятные биологические эффекты. С уче-

Таблица 6

Определение токсического действия водного раствора, содержащего ионы мышьяка (III), а также в присутствии сульфид-иона, на низшие ракообразные *Daphnia magna*

Концентрация, мкг/дм ³	Тест-реакция	Результат
1	Достоверность отклонения плодовитости	Оказывает хроническое токсическое действие
10		
100	Гибель тест-объекта (20%)	
10 (As ³⁺ +S ²⁻)	Достоверность отклонения плодовитости	Хроническое токсическое действие отсутствует

том того, что содержание ион мышьяка (III) от 1 до 100 мкг/дм³ оказывает хроническое токсическое действие на *Daphnia magna*, являющихся частью трофической цепи, можно сделать вывод о том, что представители водной биоты более чувствительны к действию мышьяка, чем человек.

При испытании модельного раствора, содержащего ион мышьяка (III) и сульфид-ион, отклонения в плодовитости не были обнаружены. Вероятно, это связано с частичным взаимодействием мышьяка с сульфидом, что приводит к образованию соединений, обладающих меньшей биодоступностью.

В ранее опубликованных работах [9] имеются сведения об образовании сероводородных зон на малых реках в районах разработки месторождений медно-колчеданных руд Южного Урала. Учитывая данные, опубликованные в литературе, можно ожидать концентрирования мышьяка в донных отложениях этих рек и последующей его десорбции при создании восстановительных условий.

На участках малых рек Юго-восточных районов РБ, подверженных частой смене окислительно-восстановительных условий, в компонентах природной среды накапливаются серосодержащие соединения с различной степенью окисления серы. В зонах скопления восстановленных соединений мышьяк может накапливаться. Все это делает необходимым изучение миграции мышьяксодержащих соединений в природных средах, разработку методик их точного определения и оценку токсических свойств.

Токсикологическое исследование необходимо при разработке экологических нормативов так же, как и изучение процессов накопления веществ в экологических системах, трансформации их с образованием более токсичных соединений, межсредовых переходов (донные отложения — вода—воздух), изучение антропогенно-измененных циклов элементов, которые имеют различные степени окисления и легко трансформируются в окружающей среде [9].



Полученные результаты должны лечь в основу экологического нормирования в зонах разработки полиметаллических месторождений и других проблемных территорий.

Список литературы

1. **Ахметов Р. М.** Техногенез геологической среды горно-рудных районов восточного Башкортостана. Автореферат на соискание кандидата геолого-минералогических наук. — Екатеринбург, 2010. 20 с.
2. **Копылов Н. И., Каминский Ю. Д.** Мышьяк / Под ред. Г. А. Толстикова. — Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2004. — 367 с.
3. **Ковковдова Л. Т., Иваненко Н. В., Симокоп М. В.** Особенности распределения As в компонентах морских прибрежных экосистем Приморья // Электронный журнал "ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ" <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/127.pdf> с 1437—1445.

4. **Филов В. А.** Вредные вещества в окружающей среде. Санкт-Петербург: НПО "Профессионал", 2005. 450 с.
5. **Геология** свинцово-цинковых месторождений Приморья // Труды ин-та геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии. Выпуск 34 / Под ред. Е. А. Радкевич. — М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. — 328 с.
6. **Ковковдова Л. Т.** Микроэлементы в морских промысловых объектах Дальнего Востока России. Автореферат на соискание доктора биологических наук, Владивосток. 2011. — 40 с.
7. **Латыпова В. З., Селивановская С. Ю., Степанова Н. Ю., Винокурова Р. И.** Региональное нормирование антропогенных нагрузок на природные среды. — Казань: Фэн, 2002. — 272 с.
8. **Жолдакова З. И., Синицина О. О.** Водохранное законодательство: Россия и мир // Методы оценки соответствия. — 2013. — № 6. — С. 32—35.
9. **Смирнова Т. П., Шайдулина Г. Ф., Сафарова В. И., Кутлиахметов А. Н.** Формирование сероводородных зон на малых реках—приемниках сточных вод горно-рудных предприятий (на примере малых рек Республики Башкортостан). // Безопасность жизнедеятельности. — 2012. — № 11. — С. 28—33.

T. P. Smirnova, Deputy Head of Division, **T. N. Mikheyeva**, Head of Division, **A. P. Stupin**, Head of Division, **A. T. Magasumova**, Head of Division, **G. F. Shaydulina**, Head of Analytical Services, **V. I. Safarova**, Head of Department, e-mail: ugak@bashnet.ru, State Analytical Control Department, Ufa, **R. S. Kuzmin**, Postgraduate Student, Institute of Ecology and Geography of Kazan (Volga) Federal University

The Research of Chronic Toxic Effect of Model Arsenic Solution with Using Objects Phyto- and Zooplankton

*In article results of determination of fertility of *Daphnia magna* and a gain of cages of *Scenedesmus quadricauda* — the standard test objects used for biotesting are published. Reliable decrease in fertility at *Daphnia magna* is shown at concentration of arsenic of 1—10 mkg/dm³ in model solution; and strengthening of *Scenedesmus quadricauda* growth at various concentration of As (III). The obtained data are discussed from the point of view of arsenic rationing in water of reservoirs of different function. The material according to the content of arsenic in water and ground deposits of the rivers, lakes, coastal sea water areas in Russia is generalized, the European countries, the USA and Japan, and also in raw materials and waste of the mining enterprises of South Ural. Need of development of ecological standards for compounds of arsenic and other elements with a variable valency is shown. It is extremely important for preservation of biological diversity of natural ecosystems, especially small rivers in development arsenical ores zones.*

Keywords: biotesting, chronic toxicity, arsenic, mining and processing works, small rivers, ecological rationing, polymetallic ores, ground deposits, environmental monitoring

References

1. **Akhmetov R. M.** Tekhnogenez geologicheskoy sredy gornorudnykh rajonov vostochnogo Bashkortostana. Avtoreferat na soiskanie kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk. Ekaterinburg. 2010. 20 p.
2. **Kopylov N. I., Kaminskij Yu. D.** Mysh'yak / Pod red. G. A. Tolstikova. Novosibirsk: Sib. univ. izd-vo, 2004. 367 p.
3. **Kovkovdova L. T., Ivanenko N. V., Simokon' M. V.** Osobennosti raspredeleniya As v komponentakh morskikh pribrezhnykh ehkosistem Primor'ya. *Elektronnyj zhurnal "ISSLEDOVANO V ROSSII"* [khttp://zhurnal.ape.relarn.ru/artitsTes/2002/127.pdf](http://zhurnal.ape.relarn.ru/artitsTes/2002/127.pdf) ts 1437—1445.
4. **Filov V. A.** Vrednye veshhestva v okruzhayushhej srede. Sankt-Peterburg: NPO "Professional", 2005. 450 p.
5. **Geologiya** svintsovo-tsinkovykh mestorozhdenij Primor'ya. Trudy in-ta geologii rudnykh mestorozhdenij, petrografii,

mineralogii i geokhimii. Vypusk 34 / Pod red. E. A. Radkevich. M.: Izd-vo Akademii nauk SSSR, 1960. 328 p.

6. **Kovkovdova L. T.** Mikroehlementy v morskikh promyslovyykh ob'ektakh Dal'nego Vostoka Rossii. Avtoreferat na soiskanie doktora biologicheskikh nauk. Vladivostok, 2011. 40 p.
7. **Latypova V. Z., Selivanovskaya S. Yu., Stepanova N. Yu., Vinokurova R. I.** Regional'noe normirovanie antropogennykh nagruzok na prirodnye sredy. Kazan': Fehn, 2002. 272 p.
8. **Zholdakova Z. I., Sinitsina O. O.** Vodokhrannoe zakonodatel'stvo: Rossiya i mir. *Metody otsenki sootvetstviya*. 2013. N. 6. P. 32—35.
9. **Smirnova T. P., Hajdulina G. F., Safarova V. I., Kutliakhmetov A. N.** Formirovanie serovodородnykh zon na malyykh rekakh—priyomnikakh stochnykh vod gornorudnykh predpriyatij (na primere malyykh rek Respubliki Bashkortostan). *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2012. N. 11. P. 28—33.

М. Ю. Шарипова, д-р биол. наук, доц., **И. Е. Дубовик**, д-р биол. наук, проф., e-mail: dubovikie@mail.ru, Башкирский государственный университет, Уфа, **Н. Н. Красногорская**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, **Э. В. Нафикова**, канд. геогр. наук, доц., **Е. А. Белозерова**, асп., Уфимский государственный авиационный технический университет

Изменение таксономической структуры сообществ водорослей экотонів при переходе от водной к наземной среде обитания

Показано, что структура экотонных сообществ водорослей при переходе от водной к наземной среде обитания характеризуется изменением видового разнообразия и обилия. Отмечено, что самое высокое видовое разнообразие наблюдается в реках и озерах в бентале, самое низкое — на урете воды и в речных, и в озерных экосистемах. В бентосе литоральной зоны озер было выявлено 259, в рипали рек — 244 вида и разновидностей водорослей. Выявленное высокое разнообразие водорослевых сообществ водно-наземных экотонів (391 таксон водорослей рангом ниже рода) свидетельствует о высокой устойчивости изученных экосистем.

Ключевые слова: водоросли, водно-наземные экотонів, видовое разнообразие, устойчивость, литоральная зона, бентос

Экотон представляет собой переход между двумя и более различными группировками (физиономично заметными), например, между лесом и лугом или между мягким и твердым грунтом морских биоценозов. Это пограничная зона, или зона напряжения, которая может иметь значительную линейную протяженность, но всегда бывает узкой от территорий самих соседних группировок [1].

Биотические комплексы экотонів уязвимы к антропогенному воздействию, поскольку они обладают особым составом, структурой и механизмами устойчивости, отличающимися от зональных. Экотонів — многофункциональные образования, их характеризуют высокая биопродуктивность и интенсивное протекание внутриводоемных процессов, следствием которых является повышенная самоочистительная способность. Экотонів имеют специфическую структуру и служат местом формирования и сохранения видового и биологического разнообразия. Экотонів осуществляют функцию природных мембран и буферную функцию [2], что особенно актуально в связи с охраной окружающей среды и утилизацией загрязненных стоков [3]. Среди методов контроля качества природных вод большое значение имеют методы биоиндикации загрязнений. По реакции сообществ водорослей оценивают характер и степень антропогенного воздействия.

Большой интерес представляет исследование сообществ водорослей при резком переходе от наземного к водному существованию, так как обита-

ние организмов в различных средах привело к появлению определенных адаптаций. Так, почвенные водоросли длительное время могут обходиться без воды, хорошо выносят колебания температуры окружающей среды [4], водные же формы чутко реагируют на изменение физических факторов [5].

Сообщества водорослей экотонів вода—суша изучали в лесостепной, степной, горно-лесной зонах на территории Башкортостана в долинах рек Белая, Ай, Ик, Усолка, Шулган, Басу; озерных котловинах карстовых (Аслы-куль, Елки-Сыккан, Игышма, Волчок) и пойменных озер (Архимандритское, Ивакуль, Долгое). В долинах рек пробы грунта отбирали от рипали (берега реки) через пойму, в озерных котловинах — через береговую область озерной котловины, которая включала литораль (прибрежная зона) и береговой склон. Эти зоны являются экотонами, т. е. переходными пространствами между различными природными средами.

Сбор почвенных образцов осуществлялся по общепринятой методике [4, 6]. Обилие водных и почвенных водорослей оценивали по 5-балльной шкале с помощью светового микроскопа [7]. Относительное обилие водорослей определяли, вычисляя долю особей данного вида от суммарного количества особей всех видов водорослей, принятого за 1. Сводные списки водорослей анализировали методами сравнительной флористики [8, 9].

Изученные в ходе исследования экотонів вода—суша отличаются большим разнообразием водорослей. Однако, несмотря на значительные отли-

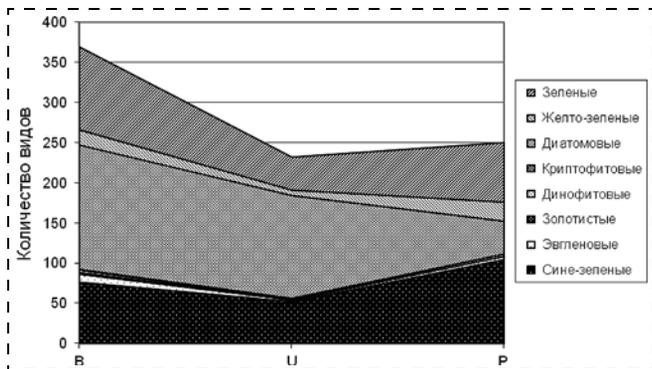


Рис. 1. Соотношение водорослей разных отделов экотона вода—суша: В — бентос; U — урез воды; P — пойма

чия экологических условий, выделяются общие признаки. В соотношении водорослей разных отделов при переходе от литорали озер к склону озерной котловины и от рипали рек к пойме происходит смена доминирующих отделов. Если в бентосе (совокупности организмов в донных горизонтах) литорали и рипали, а также урезе воды это диатомовые водоросли, то в пойме — сине-зеленые (рис. 1). Количество видов водорослей при этом уменьшается.

В экотонах озер половина видового состава водорослей приходится на литораль, на урезе воды и в пойме озерной котловины выявлено примерно равное количество видов (рис. 2). В экотонах рек видовой состав водорослей бентоса рипали составлял только 1/3 от общего количества видов. За счет этого увеличивается доля пойменных водорослей (до 42 %). Изменение показателя относительного обилия водорослей в озерных и речных экотонах также различалось (рис. 3, 4).

В озерных экотонах показатели относительного обилия водорослей при переходе из водной в наземную среду обитания снижаются у диатомовых, остаются на том же уровне у зеленых, возрастают

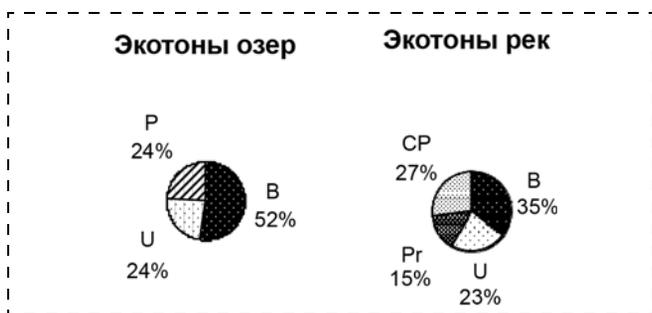


Рис. 2. Соотношение количества видов водорослей в экотонах вода—суша озер и рек: В — бенталь (область водоема, заселенная данными организмами); U — урез воды; P — пойма; Pr — прирусловье; CP — центральная пойма

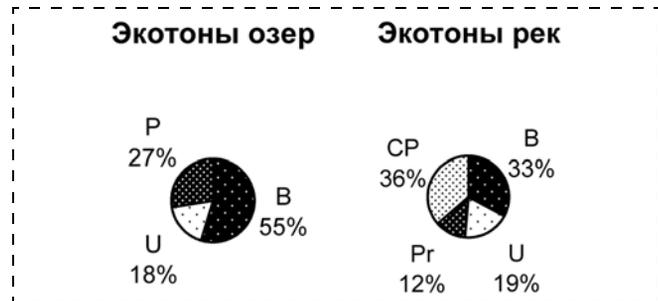


Рис. 3. Относительное обилие водорослей в экотонах вода—суша озер и рек:

В — бентос; U — урез воды; P — пойма; Pr — прирусловье; CP — центральная пойма

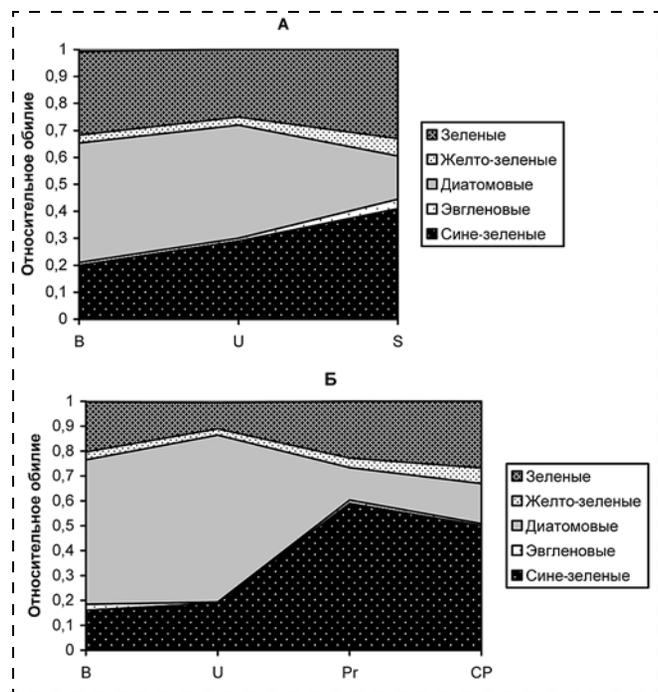


Рис. 4. Изменение относительного обилия водорослей разных отделов в озерных (А) и речных (Б) экотонах:

В — бентос; U — урез воды; S — склон озерной котловины; Pr — прирусловье; CP — центральная пойма

у сине-зеленых водорослей. В речных экотонах наблюдается увеличение от рипали к пойме относительного обилия водорослей основных отделов (кроме диатомовых), особенно, сине-зеленых (в 4 раза). Развитие сине-зеленых водорослей в экотональных сообществах водорослей было отмечено как для наземных, так и водных экосистем [10, 11]. На урезе воды и в речных, и в озерных экотонах видовой состав и обилие водорослей были самыми низкими.

В бентосе литоральной зоны озер всего было выявлено 259, в рипали рек — 244 вида и разновидностей водорослей. В целом в составе бентоса обнаружен 391 таксон водорослей рангом ниже рода (табл. 1). Сходство видового состава водорослей

Таксономический спектр бентосных водорослей исследованных озер и рек

Отдел водорослей	Число					
	классов	порядков	семейств	родов	видов	видов и разновидностей
Сине-зеленые	3	5	16	27	73	79
Эвгленовые	1	1	1	2	10	10
Золотистые	1	1	1	2	2	2
Динофитовые	1	2	2	3	3	3
Криптофитовые	1	1	1	1	1	1
Диатомовые	2	4	16	31	140	170
Желто-зеленые	3	4	9	9	19	19
Зеленые	2	9	27	47	104	107
Всего	14	27	73	122	352	391

бентоса изученных рек и озер 45 %. Донные осадки водоемов можно также рассматривать в качестве экотонных зон — переходных от гидросферы к литосфере [12]. Поскольку литораль и рипаль также являются экотонами, бентос можно рассматривать как "экотон в экотоне".

В бентосе озер и рек преобладают представители диатомовых, однако доля водорослей этого отдела в реках весомее. Соответственно в озерах более представлены водоросли отделов зеленых, сине-зеленых и др. (рис. 5). В сообщества водорослей бентоса озер входят представители восьми отделов, а рек — шести.

Такое соотношение водорослей основных отделов характерно для бентоса всех изученных пойменных озер и крупного карстового Аслы-куль. В мелких карстовых озерах по количеству видов доминируют либо зеленые водоросли (озера близ заповедника Шульган-Таш), либо сине-зеленые (озеро Волчок, находящееся в черте г. Уфы) (табл. 2).

В реках состав бентоса в большой степени определяется характером гранулометрического состава русловой фации. Как известно, сообщества водорослей обрастаний наиболее разнообразны и обильны на крупных камнях [13, 14]. Альгофлора в водотоках характеризуется не только более высокой биомассой и продукцией, но и более разнообразным видовым составом [15, 16]. В исследованиях на галечно-каменистых отложениях обнаружены самые богатые в видовом отношении сообщества водорослей (реки Басу, Белая в верхнем течении). На песчано-гравелистом субстрате в реке Ай, песчано-галечном в Усолке и песчано-илистом в реке Ик сообщества водорослей беднее (табл. 3).

В составе литореофильных сообществ наибольшей частотой встречаемости и обилием характеризовались виды, которые имеют либо органы при-

крепления, либо образуют слизистые тяжи, что способствует удержанию на субстрате. Псамморифильные сообщества беднее по количеству видов водорослей и их обилию. Они представлены одно-

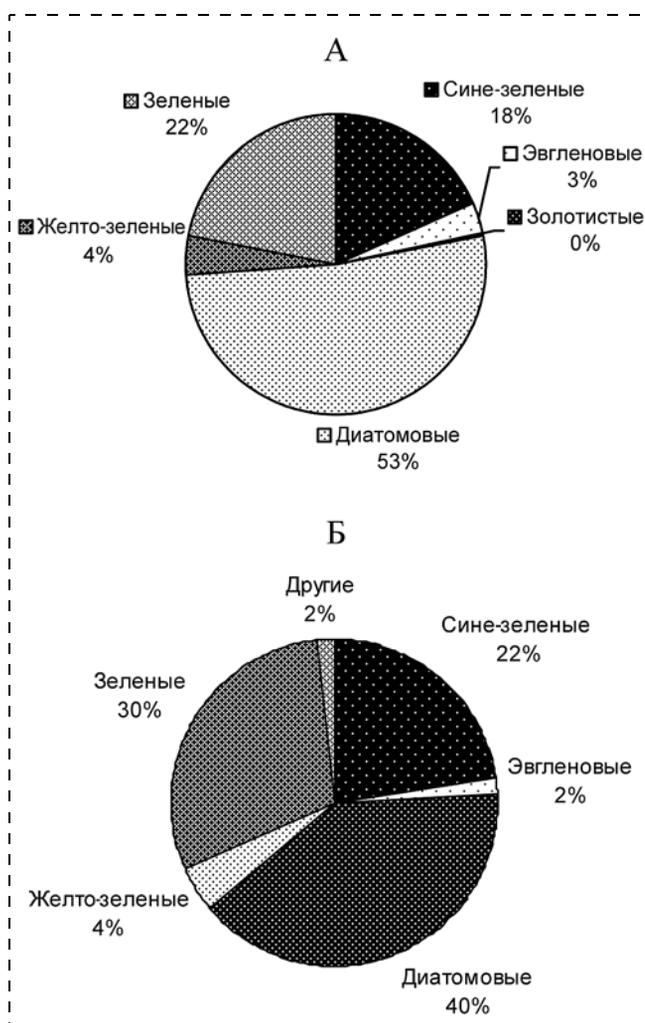


Рис. 5. Соотношение водорослей разных отделов в бентосе рипали рек (А) и литорали озер (Б)



Таблица 2

Таксономический состав водорослей бентоса литорали изученных озер

Отдел водорослей	Волчок	Долгое (пойма реки Белой)	Архимандритское	Долгое (пойма реки Уфа)	Игышма	Елки-Сык-кан	Аслы-куль	Ива-куль
Сине-зеленые	20	5	15	8	9	3	13	12
Эвгленовые	0	0	1	0	0	1	2	1
Золотистые	1	0	0	0	0	0	0	0
Динофитовые	1	2	0	0	0	1	0	0
Криптофитовые	0	0	0	0	0	0	0	1
Диатомовые	15	24	25	8	17	20	40	41
Желто-зеленые	1	1	6	2	2	1	0	1
Зеленые	16	21	15	2	25	20	19	17
Всего	54	53	62	20	53	46	74	73

Таблица 3

Таксономический состав водорослей бентоса рипали изученных рек

Отдел водорослей	Ик	Ай	Шульган	Басу	Усолка	Белая*		
						1	2	3
Сине-зеленые	13	4	0	13	16	16	6	7
Эвгленовые	0	5	0	1	0	1	2	1
Золотистые	0	0	0	0	0	1	0	0
Диатомовые	32	25	13	50	31	53	17	33
Желто-зеленые	0	5	3	1	1	3	0	0
Зеленые	7	17	5	13	3	22	8	7
Всего	52	56	21	78	51	96	33	48

* 1 — Бурзянский район, 2 — Гафурийский район, 3 — Уфимский район.

Таблица 4

Таксономический состав водорослей бентоса озер

Отдел водорослей	Число					
	классов	порядков	семейств	родов	видов	видов и разновидностей
Сине-зеленые	2	3	13	23	55	58
Эвгленовые	1	1	1	2	4	4
Золотистые	1	1	2	2	3	3
Динофитовые	1	1	1	1	1	1
Криптофитовые	1	1	1	1	1	1
Диатомовые	2	4	14	26	85	103
Желто-зеленые	2	3	7	7	11	11
Зеленые	2	8	23	41	76	78
Всего	12	22	62	103	236	259

клеточными способными к передвижению диатомовыми, нитчатыми сине-зелеными, эвгленовыми, реже нитчатыми и ценобиальными зелеными водорослями. Пелореофильные сообщества обнаружены в заводи равнинной части реки Белой, где наблюдалось большое обилие и разнообразие водорослей.

Альгоценозы эпипелона — водорослей на поверхности различных по характеру отложений в зоне контакта вода—дно в озерах высоких широт на 60...94 % представлены диатомовыми водорослями [17]. В мелководных озерах с отложениями

богатыми органикой ведущей группой становятся сине-зеленые и зеленые водоросли [16].

Спектр ведущих классов и порядков водорослей бентоса рек и озер отражает соотношение их по основным отделам. В реках доминирует класс собственно зеленых водорослей, в озерах — класс гормогониевых. Первое ранговое место во всех водоемах принадлежит семейству навикуловых водорослей из отдела диатомовых (12...14 % всех видов). Состав ведущих семейств альгофлоры озер, за исключением диатомовых, отличался преобла-

Таксономический состав водорослей бентоса рек

Отдел водорослей	Число					
	классов	порядков	семейств	родов	видов	видов и разновидностей
Сине-зеленые	3	5	13	21	44	45
Эвгленовые	1	1	1	1	8	8
Золотистые	1	1	1	1	1	1
Диатомовые	2	4	13	24	107	127
Желто-зеленые	3	4	5	5	10	10
Зеленые	2	7	19	27	53	53
Всего	12	22	52	79	223	244

данием представителей осцилляториевых и десмидиевых водорослей, которые в бентосе рек занимали более низкие места.

В табл. 4, 5 зафиксировано не только преобладание общего числа видов водорослей в альгофлоре бентоса озер, но и количества семейств и родов. Отсюда в озерах выше и значение родовой насыщенности семейств по сравнению с реками (1,7 и 1,5). Высокое разнообразие водорослевых сообществ водно-наземных экотонів свидетельствует о высокой устойчивости изученных экосистем.

Список литературы

1. **Одум Ю.** Основы экологии. — М.: Мир, 1975. — 744 с.
2. **Залетаев В. С.** Мировая сеть водно-наземных экотонів, ее функции в биосфере и роль в глобальных изменениях // Экотонів в биосфере / Под ред. В. С. Залетаева. — М.: РАСХН. 1997. — С. 77—90.
3. **Харченко Т. А.** Концепция экотонів в гидробиологии // Гидробиологический журнал. — 1991. — Т. 27. — № 4. — С. 3—9.
4. **Штина Э. А., Голлербах М. М.** Экология почвенных водорослей. — М.: Наука, 1976. — 143 с.
5. **Водоросли:** Справочник / Под ред. Вассера С. П. — Киев: Наук. думка, 1989. — 608 с.
6. **Хазиев Ф. Х., Кабиров Р. Р.** Количественные методы почвенно-альгологических исследований. — Уфа: БФАН СССР, 1986. — 172 с.
7. **Шарипова М. Ю., Дубовик И. Е.** Современные методы альгологии. — Уфа: РИЦ БашГУ, 2012. — 114 с.
8. **Толмачев А. И.** Введение в географию растений. — Л.: ЛГУ, 1974. — 244 с.
9. **Юрцев Б. А.** Сравнительная флористика в России: вклад школы А. И. Толмачева // Ботанический журнал. — 2004. — Т. 89. — № 3. — С. 385—399.
10. **Факторович Л. В.** Почвенные водоросли долины реки Шивилинг-Хем (Республика Тыва): автореф. дис. ... канд. биол. наук / Факторович Л. В.; Центр. сиб. ботан. сад СО РАН. — Новосибирск, 2002. — 16 с.
11. **Ким Г. В., Митрофанова Е. Ю.** Структурно-функциональная организация фитоперифитона литорали Телецкого озера // Актуальные проблемы современной альгологии: Тез. докл. III Междунар. конф. Под ред. Т. В. Догадиной. — Харьков, 2005. — С. 67—68.
12. **Намсараев Б. Б., Самаркин В. А., Нельсон К., Кламп Б., Бухгольц М., Ремсен К., Майер Ч., Болгриен Д.** Микробная деструкция органического вещества в различных экотонів озера Мичиган // Экотонів в биосфере. — М.: РАСХН, 1997. — С. 293—303.
13. **Константинов А. С.** Общая гидробиология. — М.: Высш. шк., 1986. — 472 с.
14. **Комулайнен С. Ф.** Формирование и функционирование фитоперифитона в реках. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. — 50 с.
15. **Hynes H. B.** The ecology of running waters. — Liverpool: Univ. Press., 1970. — 156 p.
16. **Гецен М. В.** Водоросли в экосистемах Крайнего Севера. — Л.: Наука, 1985. — 165 с.
17. **Moore J. W.** Distribution and abundance of attached littoral algae in 21 lakes and streams in the Northwest Territories // Can. J. Bot. — 1979. — V. 57. — N. 6. — P. 568—577.

M. J. Sharipova, Associate Professor, **I. E. Dubovik**, Professor, dubovikie@mail.ru, Bashkir State University, Ufa,

N. N. Krasnogorskaya, Professor, Head of Chair, **E. V. Nafikova**, Associate Professor, **E. A. Belozeroва**, Postgraduate Student, Ufa State Aviation Technical University

Change of Taxonomical Structure of Algae Communities of Ecotones upon Transition from Aquatic to Terrestrial Habitat

The structure of ecotonic algae communities upon transition from aquatic to terrestrial habitat is characterized by a change in species diversity and abundance. The highest species diversity were observed in rivers and lakes in the benthic, the lowest — in the water edge both in river, and in lake ecosystems. In the benthos of the littoral



zone of lakes just 259 were found in rivers rip — 244 species and varieties of algae. Total there were identified 391 taxa of algae below the rank of genus. The river's benthos is largely determined by the nature of the particle size distribution of the riverbed facies. On gravel and stony sediments there were found the richest species of algae (river Basu, Belaya in the riverhead). Range of leading classes and orders of benthic algae of rivers and lakes reflects the ratio of the main departments. In rivers class Chlorophyceae dominates, in lakes — Gormogoniophyceae. The first-place ranking in all waters belongs to Naviculaceae family of diatoms (12—14 % of all species). The structure of the leading families of algal flora of lakes, with the exception of diatoms, differed of a predominance Oscillatoriaceae and Desmidiaceae that in the rivers took lower places. The complex algological characteristics showed considerable distinctions of algae communities in the studied ecotops. High diversity of algal communities of water-land ecotones indicates a high stability of ecosystems studied.

Keywords: algae, water-land ecotones, species diversity, sustainability, littoral zone, benthos

References

1. **Odum J.** Osnovy ekologii. M.: Mir, 1975. 744 p.
2. **Zaletaev B. C.** Mirovaja set' vodno-nazemnyh jekotonov, ee funkcii v biosfere i rol' v global'nyh izmenenijah. *Jekotony v biosfere* / Pod red. V. S. Zaletaeva. M.: RASHN, 1997. P. 77—90.
3. **Harchenko T. A.** Konceptija jekotonov v gidrobiologii. *Gidrobiologicheskij zhurnal*. 1991. V. 27, N. 4. P. 3—9.
4. **Shtina E. A., Gollerbah M. M.** Jekologija pochvennyh vodoroslej. M.: Nauka, 1976. 143 p.
5. **Vodorosli:** Spravochnik / Pod red. S. P. Vassera. Kiev: Nauk. dumka, 1989. 608 p.
6. **Haziev F. H., Kabirov R. R.** Kolichestvennye metody pochvenno-al'gologicheskij issledovanij. Ufa: BFAN SSSR, 1986. 172 p.
7. **Sharipova M. J., Dubovik I. E.** Sovremennye metody al'gologii. Ufa: RIC BashGU, 2012. 114 p.
8. **Tolmachev A. I.** Vvedenie v geografiju rastenij. L.: LGU, 1974. 244 p.
9. **Jurcev B. A.** Sravnitel'naja floristika v Rossii: vklad shkoly A. I. Tolmacheva. *Botanicheskij zhurnal*. 2004. V. 89, N. 3. P. 385—399.
10. **Faktorovich L. V.** Pochvennye vodorosli doliny reki Shivilig-Hem (Respublika Tyva): avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. Centr. sib. botan. sad SO RAN. Novosibirsk, 2002. 16 p.
11. **Kim G. V., Mitrofanova E. J.** Strukturno-funkcionarnaja organizacija fitoperifitona litorali Teleckogo ozera. *Aktual'nye problemy sovremennoj al'gologii: Tezisy dokladov III Mezhdunarodnoj konferencii* / Pod red. T. V. Dogadinov. Har'kov, 2005. P. 67—68.
12. **Namsaraev B. B., Samarkin V. A., Nel'son K., Klamp B., Buhgol'c M., Remsen K., Majer Ch., Bolgrien D.** Mikrobnaja destrukcija organicheskogo veshhestva v razlichnyh jekotonah ozera Michigan. *Jekotony v biosfere*. M.: RASHN, 1997. P. 293—303.
13. **Konstantinov A. S.** Obshhaja gidrobiologija. M.: Vysshaja shkola, 1986. 472 p.
14. **Komulajnen S. F.** Formirovanie i funkcionirovanie fitoperifitona v rekah. Petrozavodsk: Karel'skij nauchnyj centr RAN, 1999. 50 p.
15. **Hynes H. B.** The ecology of running waters. Liverpool: Univ. Press., 1970. 156 p.
16. **Gecen M. V.** Vodorosli v jekosistemah Krajnego severa. L.: Nauka, 1985. 165 p.
17. **Moore J. W.** Distribution and abundance of attached littoral algae in 21 lakes and streams in the Northwest Territories. *Can. J. Bot.* 1979. V. 57, N. 6. P. 568—577.

УДК 004.032.26:504.4.06

Н. Н. Красногорская, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой,
Э. В. Нафикова, канд. геогр. наук, доц., **Е. А. Белозерова**, асп.,
e-mail: elena.belozerova.ufa@gmail.com, Уфимский государственный авиационный
технический университет

Восстановление пропущенных геоэкологических данных с помощью элементов искусственного интеллекта (на примере характеристик водосборного бассейна реки Белая)

Рассмотрена возможность использования элементов искусственного интеллекта (искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов) для восстановления пропущенных геоэкологических данных. Предложены методы восстановления пропущенных геоэкологических данных при наличии и отсутствии данных наблюдений пунктов-аналогов. Построено и обучено 5000 искусственных нейронных сетей трех архитектур: многослойный перцептрон (MLP), радиально-базисные функции (RBF), обобщенно-регрессионные сети (GRNN). Установлено, что наилучшей для восстановления пропусков в рядах гидрологических,

метеорологических и астрономических данных является сеть GRNN, а для восстановления гидрохимических данных — сети GRNN и RBF. Нейросетевые модели восстановления астрономических, метеорологических, гидрологических и гидрохимических показателей апробированы на примере реки Белая.

Ключевые слова: геоэкологические параметры, искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы, отбор входных параметров, обучение, восстановление пропущенных данных

При исследовании геоэкологических процессов водотока возникают сложности, связанные с пропусками данных и отбором значимых входных параметров. Многолетние ряды накопленных гидрологических, гидрохимических и метеорологических данных наблюдений (ежедневные, среднемесячные и среднегодовые значения расходов и уровней воды, скорости течения, показатели качества воды и т. д.) характеризуются наличием пропусков, связанных, например, с невозможностью наблюдения, потерей данных и т. п. Как правило, плотность пропусков высока и расположены они нерегулярно.

Для восстановления пропущенных гидрометеорологических данных широко используют статистические методы [1, 2]. При этом заменяют пропуски либо средним значением данного показателя, либо удаляют пропущенные данные из временных рядов.

Использование статистических методов приводит к потере информации или значительному ее искажению, что впоследствии может стать причиной неверного прогноза. К тому же изменяющаяся антропогенная нагрузка на водный объект делает невозможным применение данных методов для оценки изменяющихся гидрологических и метеорологических параметров [3, 4].

Для построения кривых обеспеченности данных о биогенном загрязнении малых водотоков стоками при недостатке натурной информации предусматривается удлинение рядов с помощью математического моделирования методом Монте-Карло [5].

Для уменьшения негативных последствий недостаточности исходных данных использован способ корректировки прогнозов путем операции постобработки, которая может быть полезной только в том случае, если она выполняется вместе с рекалибровкой гидрологической модели в режиме реального времени при помощи таких быстрых и экономичных инструментов, как, например, алгоритмы, основанные на методе SLS (Stereo Local Service) [6].

Для восстановления гидрологических данных Н. Д. Канарским, М. А. Михалевым, И. А. Шикломановым [7] предложен метод гидрологической аналогии с уже изученной рекой. Сложность данного метода заключается в подборе реки — аналога, которая подвергалась бы одинаковой антропогенной нагрузке с исследуемым водотоком.

Известные методы по прогнозированию временных рядов, в том числе природных процессов

(температуры воздуха и количества осадков), с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) [8—11] можно также использовать для восстановления пропущенных геоэкологических данных.

В настоящей работе для восстановления пропущенных геоэкологических данных использовалась модель прогнозирования временных рядов с помощью ИНС. На рис. 1 представлена схема структуры нейросети при восстановлении геоэкологических данных. В качестве примера рассмотрено восстановление гидрохимических показателей по гидрометеорологическим и гидрохимическим данным.

Предприняты попытки исследовать возможности применения генетических алгоритмов (ГА) для оптимизации процесса обучения ИНС, направленной на уменьшение объема вычислений при условии сохранения точности решения на требуемом уровне [12, 13]. Генетические алгоритмы — это адаптивные методы поиска, которые в последнее время используются для решения задач оптимизации. В них используются как аналог механизма генетического наследования, так и аналог естественного отбора. При этом сохраняется биологическая терминология в упрощенном виде и основные понятия линейной алгебры [12].

Анализ некоторых работ [13, 14] показал, что для восстановления пропущенных данных природных процессов наиболее предпочтительно использование ИНС следующих структур: многослойный персептрон (MLP), радиально-базисные функции (RBF), обобщенно-регрессионные сети (GRNN).

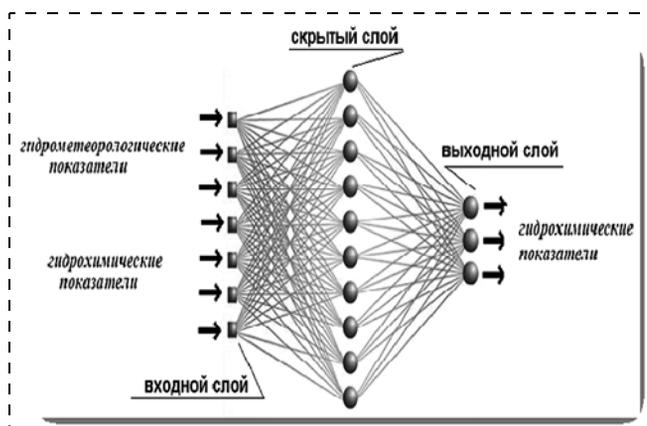


Рис. 1. Схема структуры нейросети при восстановлении геоэкологических данных

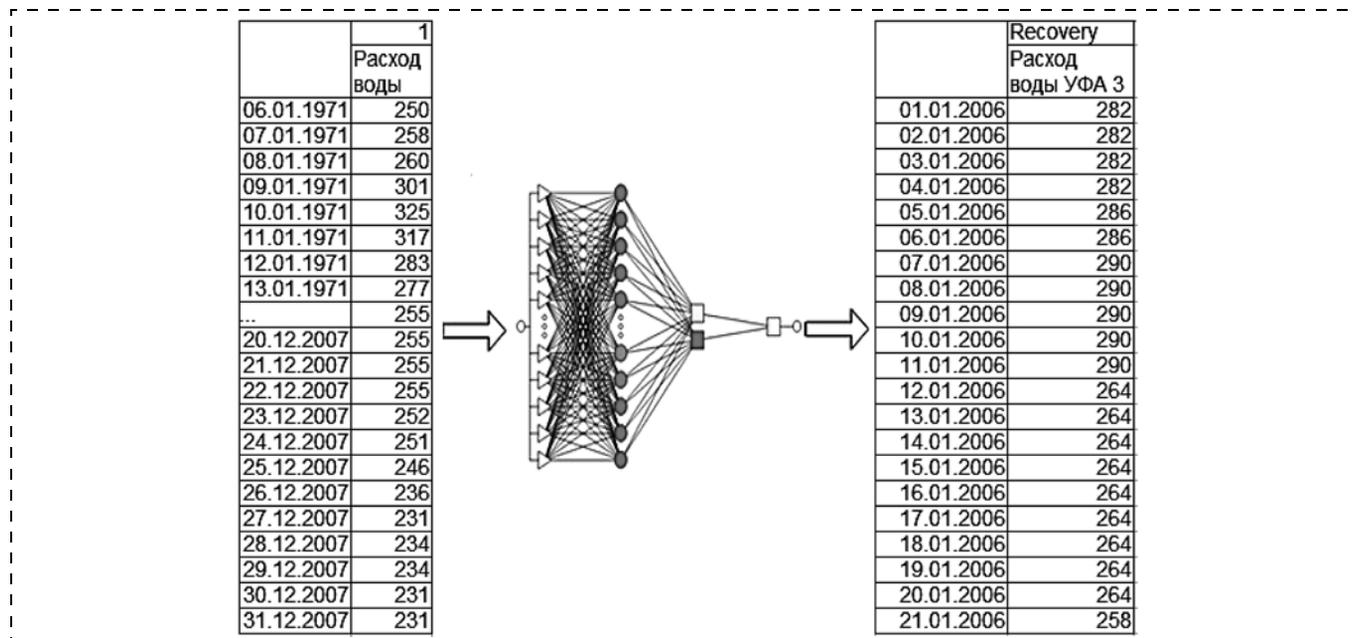


Рис. 2. Входные и выходные параметры восстановления гидрологических параметров

Восстановление пропущенных данных на основании аппарата ИНС осуществлялось в четыре этапа:

- 1) подготовка исходных данных для восстановления требуемого показателя;
- 2) обучение искусственных нейронных сетей;
- 3) оценка результатов обучения нейронных сетей;
- 4) использование обученных сетей для восстановления данных.

При этом предлагалось использовать два метода восстановления пропущенных данных посредством искусственных нейронных сетей:

- 1) восстановление пропущенных данных при наличии только данных восстанавливаемого показателя за многолетний период (например, уровни воды за период исследования с наличием пропусков);
- 2) восстановление пропущенных данных при наличии данных восстанавливаемого показателя и данных пунктов-аналогов за многолетний период (например, уровни воды за период исследования с наличием пропусков и уровни воды створа/ов-аналога/ов).

Для восстановления пропущенных геоэкологических параметров использована модель, анализирующая связь между ежедневными данными о гидрологическом показателе — модель временного ряда (рис. 2). Использование такой модели основано на том, что реальные геоэкологические параметры представляют собой результат воздействия всех факторов, в том числе и тех, которые невозможно учесть или описать в числовой форме. Данная модель может быть реализована только при

значительных объемах данных (т. е. данные должны быть ежедневные и за значительный промежуток времени).

Реализация восстановления пропущенных геоэкологических параметров с помощью искусственных нейронных сетей выполнена в программном продукте Statistica 7,0.

Схема восстановления пропущенных данных при наличии данных только восстанавливаемого показателя за многолетний период графически интерпретирована на рис. 3 (см. 3-ю стр. обложки).

При восстановлении пропущенных данных с наличием данных только восстанавливаемого показателя входными параметрами ИНС являются данные пункта наблюдения за многолетний период, показания которого необходимо восстановить (далее — восстанавливаемый пункт наблюдения).

При подготовке входных (исходных) данных для модели восстановления с помощью ИНС важную роль играет качество подготовленных исходных данных:

- достаточность периода используемых исходных данных: период используемых данных не менее 3 лет для восстановления ежедневных показателей с плотностью пропусков 20 % (соответственно при увеличении плотности пропусков увеличивается требуемый период исходных данных);
- не менее 30 лет — для среднесуточных показателей (с учетом 15-летних и 11-летних циклов гидрологических и метеорологических процессов);
- использование данных за период со стабильной антропогенной нагрузкой.

На основании вводимых данных проводилось обучение ИНС: подстройка весов сети и выбор наилучшего примера ИНС для восстановления требуемого показателя.

Схема восстановления пропущенных данных с помощью искусственных нейронных сетей при наличии данных восстанавливаемого показателя и данных пунктов-аналогов за многолетний период графически интерпретирована на рис. 4 (см. 4-ю стр. обложки). В качестве пунктов-аналогов рассматривались пункты наблюдения, расположенные в схожих физико-географических условиях и/или ближайшие пункты наблюдения (например, для створов реки — створы выше и ниже по течению).

При восстановлении пропущенных данных входными параметрами ИНС за многолетний период являлись:

- данные восстанавливаемого пункта наблюдения;
- данные пунктов-аналогов восстанавливаемого пункта наблюдения.

Следует отметить, что при восстановлении данных возможно использование пунктов-аналогов с пропусками данных за определенные периоды, но наличием данных на восстанавливаемый период.

Недостаточность объема и качества обучающей выборки при данном методе восстановления компенсируется качеством подбора подходящего пункта/ов-аналога/ов. Подбор подходящего пункта/ов-аналога/ов выполнялся с помощью генетических алгоритмов. С их помощью также происходит отбор значимых параметров, т. е. параметров, оказывающих влияние на восстанавливаемые данные.

Подстройка весов ИНС при обучении и выбор наилучшего примера ИНС для восстановления требуемого показателя происходит аналогично способу восстановления пропущенных данных с помощью ИНС при наличии только данных восстанавливаемого показателя за многолетний период.

Для восстановления пропущенных гидрологических, гидрохимических, метеорологических и астрономических данных по данному методу также использовались ИНС трех вышеперечисленных структур.

С помощью инструмента Intelligent Problem Solver программы Statistica 7,0 построено и обучено 5000 ИНС трех структур с различным числом нейронов, из которых отобраны наилучшие модели (с наименьшей ошибкой до 10 %) каждого типа структуры ИНС.

Для оценки процесса обучения ИНС с целью восстановления гидрологических, гидрохимических, метеорологических и астрономических данных были использованы перечисленные ниже параметры.

1. *Средняя абсолютная/относительная ошибка сети* — это средняя абсолютная разность расчетных и фактических значений. Если средняя относительная ошибка менее 20 %, то сеть обеспечивает хорошую сходимость расчетных и фактических значений.

2. *Коэффициент корреляции* — показатель, характеризующий взаимосвязь реальных и моделируемых значений. Если значение коэффициента больше 0,7, то сеть применима для прогноза, поскольку обеспечивает хорошую сходимость расчетных и фактических значений.

3. *Производительность сети (S. D. Ratio)* — это отношение стандартного отклонения ошибок сети к стандартному отклонению исходных данных. Если производительность сети не превышает значения 0,2, то сеть подобрана хорошо, чего очень сложно достичь вследствие, например, зашумленности данных (неточно заданных данных, полученных экспериментально) [15].

По результатам оценки обучения GRNN, RBF, MLP сетей (по показателям ошибок обучения, ошибок обобщения, ошибок прогноза на тестовой выборке) наилучшей для восстановления пропусков в рядах гидрологических, метеорологических и астрономических данных выбрана GRNN, а для восстановления гидрохимических — GRNN и RBF. Выбор сетей обусловлен удовлетворительными результатами обучения (коэффициенты корреляции расчетных и фактических значений от 0,8 до 0,99), а также способности сети GRNN к учету цикличности величин.

Результаты обучения сети GRNN для восстановления пропущенных гидрологических данных представлены в таблице.

Как видно из нее, параметры результатов обучения сети GRNN удовлетворительны: коэффициент корреляции реальных и моделируемых значений составляет 0,99 (рис. 5). Это свидетельствует о хорошей сходимости модели ИНС восстановления

Параметры результатов обучения сети GRNN для восстановления уровней воды реки Белая в створе г. Белорецк (д/о Арский Камень) за 2006 г.

Параметры обучения	Значения параметров
Структура сети	GRNN 365-338-2-1
Средняя абсолютная разность реальных и моделируемых значений	3,85
Коэффициенты корреляции расчетных и фактических значений	0,99
Отношение стандартного отклонения ошибки сети к стандартному отклонению исходных данных	0,11

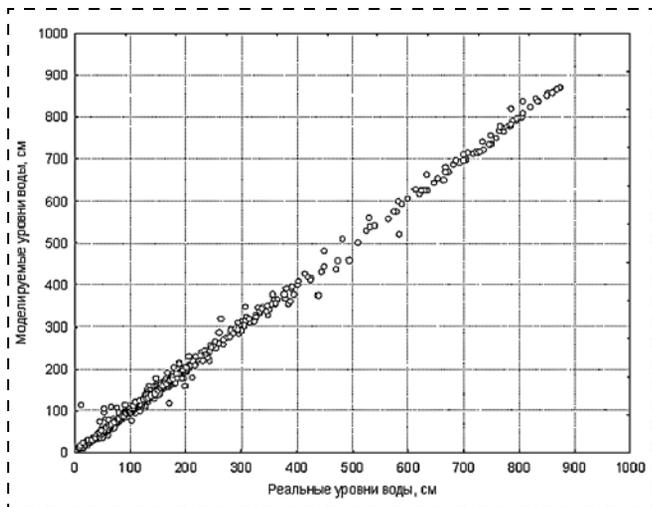


Рис. 5. Реальные и моделируемые ежедневные значения уровня воды в пункте наблюдения: река Белая — г. Белорецк (д/о Арский Камень), 2006 г.

пропущенных данных и является наиболее важным показателем сети для решения данной задачи.

Обученная нейронная сеть использована для восстановления пропущенных уровней воды реки Белая в створе г. Белорецк (д/о Арский Камень) за 1990 г. (рис. 6).

Аналогично восстановлены пропущенные данные:

— метеорологические показатели: температуры на изобарической поверхности АТ-850 гПа метеостанции Уфа—Дема в период 2003—2008 гг.;

— астрономические показатели: угловая скорость вращения Земли в период 1971—2005 гг.;

— гидрохимические показатели: содержание СПАВ, нефтепродуктов, фенолов в реке Белая в створах городов Белорецк, Стерлитамак, Уфа и Бирск в период 1990—2000 гг.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование традиционных методов для восстановления пропущенных данных — непростая задача, так как каждый из них имеет собственные недостатки. Вследствие этого необходимо использование технологий искусственного интеллекта, как например генетического алгоритма, имитирующего процессы естественного отбора при восстановлении пропущенных геоэкологических данных.

Результаты показывают, что искусственные нейронные сети могут служить одним из адекватных инструментов для восстановления пропусков в гидрологических данных, что позволит существенно повысить качество и скорость обработки информации, расширить их возможности в прикладных, исследовательских, учебных и других задачах, связанных с анализом и прогнозом экологического состояния водных объектов.

Список литературы

1. **Методические рекомендации** по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. — СПб: Государственный гидрологический институт, 2009. — 193 с.
2. **Шелутко В. А.** Методы обработки и анализа гидрологической информации. — СПб., 2007. — 192 с.
3. **Shaw E.** Hydrology in Practice. Taylor & Francis e-Library, 2010. — 613 p.
4. **Егоренков Л. И., Качуров Б. И.** Геоэкология. — М.: Финансы и статистика, 2005. — 320 с.
5. **Коваленко С. Н.** Прогнозирование концентраций биогенных загрязняющих веществ в малых водотоках на основе тематического моделирования методом Монте-Карло // Экология промышленного производства. — 2010. — № 1. — С. 10—13.
6. **Кузьмин В. А., Коротыгина У. Е., Гаврилов И. С., Сурков А. Г., Сергеев С. Ю.** О возможности повышения заблаговременности прогнозов стока средних рек путем стыковки гидродинамических моделей погоды и гидрологических моделей // Ученые записки РГМУ. — 2010. — № 16. — С. 22—27.

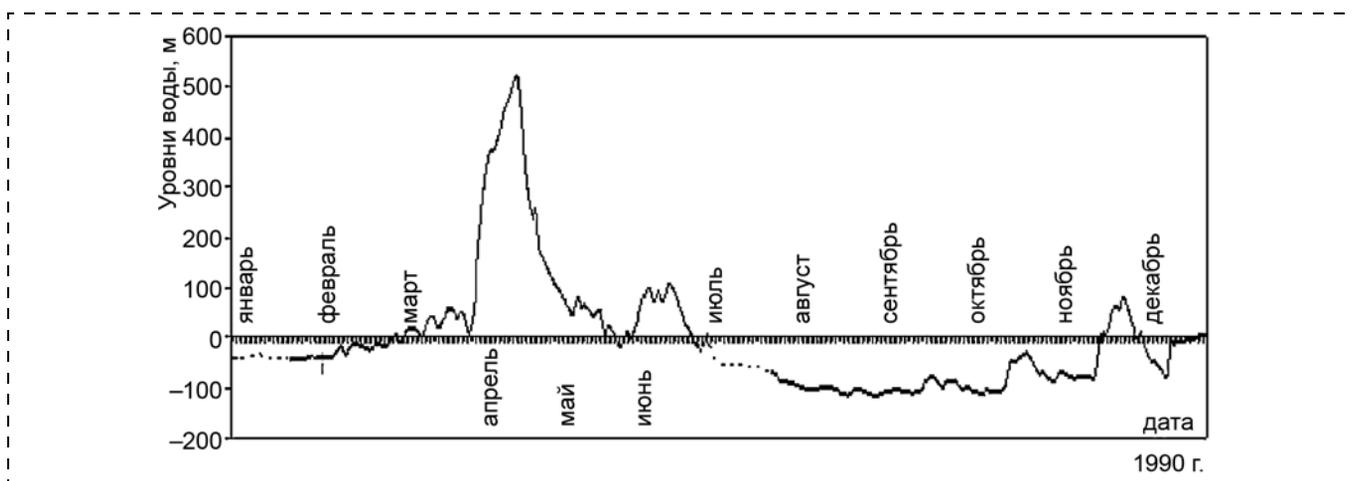


Рис. 6. Восстановленные уровни воды в реке Белая в створе г. Белорецк (д/о Арский Камень) за 1990 г.:

— реальные уровни воды; - - - - - восстановленные уровни воды

7. Шикломанов И. А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — 267 с.
8. El-Shafie A., Abdin A., Noureldin A., Taha M. Enhancing Inflow Forecasting Model at Aswan High Dam Utilizing Radial Basis Neural Network and Upstream Monitoring Stations Measurements. *Water Resources Management*. September 2009. — V. 23. — Issue 11. — P. 2289–2315.
9. Aguilera P. A., Garrido Frenich A., Torres J. A., Castro H. Application of the Kohonen neural network in coastal water management: methodological development for the assessment and prediction of water quality. *Water Research*. — 2001. — N. 37 (4). — P. 112–116.
10. Jain S. K., Das A., Srivastava D. K. Application of ANN for reservoir inflow prediction and operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*. — 1999. — N. 125 (5). — P. 263–271.
11. Jayawardena A. W., Fernando D. A. K., Zhou M. C. Comparison of multilayer perceptron and radial basis function networks as tools for flood forecasting. IAHS Publication (International Association of Hydrological Sciences). 1997. 239 p.
12. Панченко Т. В. Генетические алгоритмы: учебно-методическое пособие / Под ред. Ю. Ю. Тарасевича. — Астрахань: Издательский дом "Астраханский университет", 2007. — 87 с.
13. Maier H. R., Dandy G. C. The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters. *Water Research* — 1999. — N. 32 (4). — P. 1013–1022.
14. Milot J., Rodriguez M. J., Serodes J. B. Contribution of neural networks for modeling quality of drinking water. *Journal of Water Resources Planning and Management*. — 2002. — N 9 (2). — P. 112–116.
15. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. — М.: Вильямс, 2005. — 432 с.

N. N. Krasnogorskaya, Professor, Head of Chair, E. V. Nafikova, Associate Professor, E. A. Belozerova, Postgraduate Student, e-mail: elena.belozerova.ufa@gmail.com, Ufa State Aviation Technical University

Missing Geocological Data Recovery Using the Elements of Artificial Intelligence (by the Example of the Catchment Area Characteristics of the River Belaya)

The possibility of artificial intelligence elements (artificial networks and Genetic algorithms) usage for missing geocological data recovery is considered. Methods of missing geocological data recovery in the presence and absence of monitoring posts — analogue data are offered. The 5000 artificial neural networks belonging to three types of architectures (multilayer perceptron (MLP), radial-basis network (RBF), generalized-regression network (GRNN)) were built and trained. It was established that the generalized regression neural network (GRNN) is the best for hydrological, meteorological and astronomical data recovery, while the generalized regression neural network (GRNN) and radial basis function (RBF) are most appropriate for the hydrochemical data restoration. Neural network recovery models for astronomical, meteorological, hydrological and hydrochemical parameters were tested on the river Belaya.

Keywords: geocological parameters, artificial neural networks, genetic algorithms, input data selection, training, missing data recovery

References

1. **Metodicheskie rekomendacii** po opredeleniju raschetnyh gidrologicheskikh harakteristik pri otsutstvii dannyh gidrometricheskikh nabljudenij. SPb: Gosudarstvennyj gidrologicheskij institut, 2009. 193 p.
2. Shelutko V. A. *Metody obrabotki i analiza gidrologicheskoy informacii*. SPb., 2007. 192 p.
3. Shaw E. *Hydrology in Practice*. Taylor & Francis e-Library, 2010. 613 p.
4. Egorenkov L. I., Kochurov B. I. *Geojekologija*. M.: Finansy i statistika, 2005. 320 p.
5. Kovalenko S. N. Prognozirovanie koncentracij biogennyh zagraznjajushchih veshhestv v malyh vodotokah na osnove matematicheskogo modelirovanija metodom Monte-Karlo. *Ekologija promyshlennogo proizvodstva*. 2010. N. 1. P. 10–13.
6. Kuz'min V. A., Korotygina U. E., Gavrillov I. S., Surkov A. G., Sergeenko S. Ju. O vozmozhnosti povyshenija zablavremennosti prognozov stoka srednih rek putem stykovki gidrodinamicheskikh modelej pogody i gidrologicheskikh modelej. *Uchenye zapiski RGGMU*. 2010. N. 16. P. 22–27.
7. Shiklomanov I. A. Vlijanie hozjajstvennoj dejatel'nosti na rechnoj stok. L.: Gidrometeoizdat, 1989. 267 p.
8. El-Shafie A., Abdin A., Noureldin A., Taha M. Enhancing Inflow Forecasting Model at Aswan High Dam Utilizing Radial Basis Neural Network and Upstream Monitoring Stations Measurements. *Water Resources Management*. September 2009. V. 23. Issue 11. P. 2289–2315.
9. Aguilera P. A., Garrido Frenich A., Torres J. A., Castro H. Application of the Kohonen neural network in coastal water management: methodological development for the assessment and prediction of water quality. *Water Research*. 2001. N. 37 (4). P. 112–116.
10. Jain S. K., Das A., Srivastava D. K. Application of ANN for reservoir inflow prediction and operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 1999. N. 125 (5). P. 263–271.
11. Jayawardena A. W., Fernando D. A. K., Zhou M. C. Comparison of multilayer perceptron and radial basis function networks as tools for flood forecasting. IAHS Publication (International Association of Hydrological Sciences). 1997. 239 p.
12. Panchenko T. V. *Geneticheskie algoritmy: uchebno-metodicheskoe posobie / Pod red. Ju. Ju. Tarasevicha*. Astrahan': Izdatel'skij dom "Astrahanskij universitet", 2007. 87 p.
13. Maier H. R., Dandy G. C. The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters. *Water Research*. 1999. N. 32 (4). P. 1013–1022.
14. Milot J., Rodrigues M. J., Serodes J. B. Contribution of neural networks for modeling quality of drinking water. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2002. N. 9 (2). P. 112–116.
15. Hajkin S. *Nejronnye seti: polnyj kurs*. M.: Vil'jams, 2005. 432 p.

УДК 622.692.4.053

А. В. Унковская, канд. техн. наук, начальник отдела,
e-mail: anna.v.unkovskaya@gmail.com, ООО "Газпром СПГ Владивосток"

Оценка частоты аварийной разгерметизации магистральных нефтепроводов (Часть 1)

Статья посвящена оценке частоты аварийной разгерметизации магистральных нефтепроводов на основе адаптации доступных статистических данных по аварийности и состоит из двух частей. Часть 1 содержит подробный сравнительный анализ баз данных по авариям на магистральных нефтепроводах. В анализ были включены хорошо известные статистические базы данных различных организаций Европы и Северной Америки, накопленная информация которых находится в открытом доступе для общественности. Анализ позволил определить наиболее подходящую статистическую базу данных для проведения расчетов частоты аварийной разгерметизации магистральных нефтепроводов с максимально возможным учетом реализуемых мер обеспечения безопасности, а также причин и факторов, способствующих возникновению аварий. Была выбрана база данных под управлением Администрации по безопасности систем транспорта и взрывоопасных веществ (PHMSA) Министерства транспорта США (DOT). Изложены основные принципы анализа, обработки и адаптации статистических данных, на основе которых была разработана методика расчета ожидаемой частоты аварийной разгерметизации каждого участка магистрального нефтепровода (Часть 2).

Ключевые слова: магистральный нефтепровод, анализ риска, количественная оценка риска, частота аварийной разгерметизации, авария, частота инцидентов/аварий, база данных по инцидентам/авариям, причины инцидентов/аварий, коррозия, деятельность третьих лиц

1. Введение

Магистральные нефтепроводы (МН) являются основным видом транспорта добытых жидких углеводородов. Несмотря на то, что по статистическим данным трубопроводы являются весьма надежным способом транспортировки, крупные аварии на МН могут иметь значительные негативные последствия для окружающей среды, а ущерб от подобных аварий может исчисляться десятками миллионов рублей. Основные опасности (ущербы) от аварий на МН заключаются в повреждении оборудования (нефтепровода) и загрязнении окружающей среды. Оценить уровень безопасности и рассчитать риск позволяет количественная оценка риска (КОР). На основе важнейшего принципа КОР можно рассчитать ожидаемую частоту аварий для МН: частота аварий и спектр аварий (распределение числа аварий по степени повреждений) для объектов со сходными (эквивалентными) техническими характеристиками, находящихся в сходных (эквивалентных) природно-климатических, геологических, антропогенных и других условиях, при применении сходных мер диагностики и обеспечения безопасности, должны совпадать [1]. Исходя из данного принципа, оценка ожидаемой частоты аварий на МН возможна на основе анализа статистики по авариям на аналогичных объектах.

Целью настоящей публикации является разработка методики расчета частоты аварийной разгер-

метизации МН, которая позволит учитывать при проведении КОР такие существенные факторы влияния на аварийность, как разнообразие природно-климатических, геологических, сейсмических и иных условий прохождения трассы трубопроводов; широкая номенклатура применяемых трубопроводов (типоразмер, толщина стенки и т. д.); меры обеспечения безопасности и снижения риска. Для этого был проведен сравнительный анализ доступных статистических баз данных по инцидентам/авариям на МН, детальный анализ выбранной статистической базы данных (часть 1), на основе которого была разработана методика расчета частоты аварийной разгерметизации каждого участка МН (часть 2). Она аналогична методике для расчета частоты аварийной разгерметизации магистральных газопроводов (МГ) [1], разработанной на основе статистической базы данных Европейской группы анализа аварийности европейских газопроводов (EGIG) и включенной в Специальные технические условия проекта "Анализ риска опасных производственных объектов проекта "Сахалин-II" [2].

2. Анализ доступных статистических данных по аварийности на магистральных нефтепроводах в России и за рубежом

Сбор данных по аварийности на МН в РФ осуществляет Ростехнадзор. Согласно Федеральному закону от 21.07.1997 № 116-ФЗ "О промышленной



Таблица 1

Организации, управляющие базами данных по инцидентам/авариям на МН

Организация	Страна/ Регион	Официальный сайт
Международная Ассоциация Нефтяных и Газовых Производителей (OGP)	Великобритания	http://www.ogp.org.uk/
Администрации по безопасности систем транспорта и взрывоопасных веществ (PHMSA) Министерства транспорта США (DOT)	США	http://www.dot.gov http://phmsa.dot.gov/pipeline
Бюро Статистики Труда Министерства труда США (BLS)	США	http://www.bls.gov/
Национальное Энергетическое Управление (NEB)	Канада	http://www.neb.gc.ca/
Департамент трудовых ресурсов и развития (HRSDC)	Канада	http://www.esdc.gc.ca/
Канадская Ассоциация Нефтепромышленников (CAPP)	Канада	http://www.capp.ca/
Комиссия по нефти и газу Британской Колумбии (OGC)	Канада	http://www.bcogc.ca/
Альберта Энерджи Регулейтор (AER)	Канада	http://www.aer.ca/
Ассоциация подрядчиков магистральных трубопроводов (PLCAC)	Канада	http://www.pipeline.ca/
Европейская Ассоциация Нефтяных Компаний (CONCAWE)	Европа	https://www.concawe.eu/
Британская Ассоциация операторов береговых трубопроводов (УКОРА)*	Великобритания	http://www.ukopa.co.uk/
Ростехнадзор	Россия	http://www.gosnadzor.ru/
Ассоциация Австралийского трубопроводного транспорта (APIA)	Австралия	http://www.apia.net.au/

* База УКОРА в основном содержит информацию о МГ. Согласно отчету Ассоциации на конец 2004 г. [3] общая длина подотчетных магистральных трубопроводов составляла 21 727 км, из них 20 001 км — МГ, а 212,6 км — МН. Кроме того, данные отчетов УКОРА о количестве аварий, их распределении в зависимости от причин возникновения и другая информация представлены для всех подотчетных трубопроводов, вне зависимости от транспортируемого продукта. Поэтому эта база данных была исключена из дальнейшего анализа.

безопасности опасных производственных объектов" фиксируются инциденты и аварии. Эти данные не являются публично распространяемыми. Начиная с 2004 г. Ростехнадзор публикует ежегодные отчеты о работе службы, в которых представлены лишь общие данные по уровню аварийности на магистральном транспорте. Но они не могут быть использованы для проведения расчета частоты аварийной разгерметизации конкретного МН. Крупные российские компании-операторы МН, например, ОАО "АК "Транснефть", ОАО "Лукойл" также ведут внутренние базы данных по аварийности, которые не публикуются.

К настоящему моменту в мире накоплен достаточный объем статистических данных по аварийности на МН, различные организации имеют свои базы данных (табл. 1).

Краткий общий анализ данных по аварийности на МГ, МН и нефтепродуктопроводах можно найти в работе [4]. Однако в рамках настоящего исследования был выполнен подробный сравнительный анализ доступных в открытой печати баз данных по инцидентам/авариям на МН, выполненный на основе работ [1, 5–7], с учетом материалов и отчетов с официальных сайтов указанных организаций, основные результаты которого изложены далее. Формы таблиц были приняты согласно работам [1, 6, 8].

Критерии, используемые для идентификации инцидентов/аварий, в различных базах представлены в табл. 2, 3 и 4.

Основные характеристики МН, которым должен удовлетворять МН для включения в базу данных, представлены в табл. 5.

Сведения о возможных причинах, вызвавших инцидент/аварию, приведены в табл. 6.

Характер повреждения МН при инциденте/аварии представлен в табл. 7.

Таблица 2

Область распространения баз данных

База данных	Поломки	Частота травмирования	Выбросы, утечки и разливы жидкостей	Выброс газа
CONCAWE	—	—	X	—
PHMSA	X	—	X	X
BLS	—	X	—	—
NEB	X	X	X	X
AER	X	—	X	X
CAPP	—	X	—	—
PLCAC	—	X	—	—
OGC	—	X	—	—
HRSDC	—	X	—	—
Ростехнадзор	X	X	X	X



Таблица 3

Идентификация инцидентов/аварий в базах данных по последствиям

База данных	Последствия				
	Непреднамеренный выброс продукта	Гибель или травма	Пожар	Воздействие на окружающую среду	Прочее
CONCAWE	X	X	X	X	—
PHMSA	X	X	X	—	Аварийное отключение, значительный инцидент
BLS	—	X	—	—	—
NEB	X	X	X	X	Выход эксплуатационных режимов за проектные
AER	X	—	—	—	Инциденты без выброса продукта
CAPP	—	X	—	—	—
PLCAC	—	X	—	—	—
OGP	—	X	—	—	—
HRSDC	—	X	—	—	—
APIA	X	—	—	—	Поломка или дефект, требующий ремонта, опасный выход давления за диапазон
Ростехнадзор	X	X	X	—	—

Доступность собранных данных для анализа (степень "открытости") в базах данных представлена в табл. 8.

Базы значительно различаются по объему, т. е. по общему числу зафиксированных инциден-

тов/аварий и экспозиции трубопроводов (общая длина поднадзорного трубопровода, наблюдаемая в течение определенного промежутка времени). Самые ранние базы статистических данных — организаций PHMSA (с 1968 г.) и CONCAWE

Таблица 4

Критерии включения инцидентов/аварий в базы данных

База данных	Критерии
CONCAWE	Минимальный объем разлива составил 1 м ³ (если же разлив оказался меньше 1 м ³ , но имеет тяжелые последствия для окружающей среды или безопасности персонала, он также включается в статистику), из береговых трубопроводов (включая возможные пересечения рек и другие небольшие водные преграды, исключая морские трубопроводы)
PHMSA	До января 2002 г.: любая поломка/утечка, если минимальный объем разлива составил 50 баррелей (8 м ³) и более жидкости, для сильно летучих веществ 5 баррелей и более. Независимо от объема разлива, если произошло возгорание или взрыв, если имеет место смерть или травма, требующая госпитализации, если ожидаемый ущерб превышает 5000 USD (до 1993 г.)/50 000 USD (с 1994 г.). До 1993 г. под "ожидаемым ущербом" подразумевался только ущерб имуществу оператора/третьих лиц или им одновременно. С 1994 г. "ожидаемый ущерб" имуществу оператора/третьих лиц или им одновременно, в который входит стоимость операций по сбору и очистке, — стоимость потерянного продукта. С февраля 2002 г.: любая поломка/утечка, если минимальный объем разлива составил 5 галлонов (19 л) и более жидкости. Независимо от объема разлива, если произошло возгорание или взрыв, если имеет место смерть или травма персонала, требующая госпитализации, если ожидаемый ущерб превышает 50 000 USD
NEB	Любая незапланированная или неконтролируемая утечка/выброс жидких углеводородов. Фиксируются отдельно утечки (leaks) любого объема (до 1,5 м ³ и более) из компонентов единиц оборудования трубопровода и выбросы (releases) объемом более 1,5 м ³ из "тела" трубы.
AER	Любая утечка или поломка трубопровода (утечка означает выброс продукта из трубопровода, поломка — отказ трубопровода, включая инциденты без выброса продукта)
Ростехнадзор	Авария — разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ (закон № 116-ФЗ от 21.07.1997). Инцидент — отказ или повреждение технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, отклонение от установленного режима технологического процесса (закон № 116-ФЗ от 21.07.1997 в редакции закона № 22-ФЗ от 04.03.2013).

Основные характеристики поднадзорных трубопроводных систем

База данных	Характеристики учитываемых трубопроводов				
	Наличие площадочных устройств	Материал трубы	Продукт	Береговые/морские	Тип трубопровода
CONCAWE	Да	Сталь	Нефть и нефтепродукты	Береговой	Магистральный
PHMSA	Да	Сталь, пластик, прочее	Природный газ и опасные жидкости	Береговой и морской	Промысловый, магистральный, распределительный
NEB	Да	Сталь	Природный газ, нефть, иные газы и жидкости	В основном береговой	Магистральный, частично промысловый
AER	Да	Сталь, пластик, прочее	Природный газ, нефть, иные газы и жидкости	Береговой	Промысловый, магистральный
APIA	Да	Любой	Природный газ, нефть, иные газы и жидкости	Береговой	Промысловый, магистральный
Ростехнадзор	Да	Сталь	Природный газ, нефть и иное	Береговой и морской	Промысловый, магистральный, распределительный

(с 1971 г.) позволяют проследить изменения в аварийности за несколько десятилетий. В целом, все статистические данные показывают снижение удельной частоты выбросов нефти за последние

годы. В отчетах, подготовленных организацией CONCAWE, представлены пятилетние смещаемые средние значения, что помогает оценить краткосрочные изменения аварийности. Также CONCAWE

Таблица 6

Основные причины, вызвавшие инцидент/аварию

База данных	Коррозия	Дефекты материала	Внешнее воздействие	Природное воздействие	Другие причины
CONCAWE	Внутренняя, внешняя	Дефекты сварных швов, материалов, конструкции, расслоение	Вспашка, работа с экскаватором, бульдозером, терроризм, другие повреждения внешними силами	Колебания температуры, оползни, оседание почвы, затопление	Трубопроводная арматура, избыточное давление, вибрации, ошибки оператора
PHMSA	Внутренняя, внешняя, стресс-коррозия	Дефекты материалов и сварных швов, отказ оборудования	Земляные работы, другие повреждения внешними силами (например, взрыв/пожар на соседнем объекте, повреждение не-землеройной техникой, врезка и др.)	Природные нагрузки, движение грунта, молнии, сильные дожди/наводнения, температура, сильные ветра	Ошибки оператора, другое
NEB	Внутренняя, внешняя, стресс-коррозия	Дефекты материалов, строительные дефекты, дефекты кольцевых сварных швов	Постороннее вмешательство	Природные нагрузки	Эксплуатация, другое
AER	Внутренняя, внешняя, стресс-коррозия	Дефекты материалов, дефекты соединений, дефекты трубы, трубопроводной арматуры, сварочные дефекты	Постороннее вмешательство (землеройные работы, вандализм)	Движение грунта, молнии, затопление	Превышение давления, ошибки монтажа, ошибки эксплуатации, другое
APIA	Внутренняя, внешняя, стресс-коррозия	Дефект материала, строительные ошибки, проектные ошибки	Внешние силы	Движение грунта, молнии, эрозия почвы	Взрывные работы, броски тока или напряжения, другое
Ростехнадзор	Внутренняя, внешняя, стресс-коррозия	Дефекты сварных соединений	Вмешательство третьих лиц	Движение грунта, вечная мерзлота, движение дюн	Другое



Таблица 7

Типы повреждений трубопроводов

База данных	Прокол/ трещина	Отверстие	Утечка	Пробой	Разрыв	Примечание
CONCAWE	X	X	X	—	X	При классификации повреждений учитывается его длина и ширина в мм. Понятия — утечка (дефекты соединений), прокол, трещина, отверстие, продольная трещина, разрыв
PHMSA	X	—	X	X	X	Дополнительно указываются: дефекты соединений, трещина/разрыв продольный, разрыв на полное сечение (кольцевой)
NEB	—	—	X	—	X	—
AER	—	—	X	—	X	—
APIA	—	—	X	X	X	Щель, деформация, повреждение покрытия, опасное сближение
Ростехнадзор	—	—	X	X	X	—

Таблица 8

Доступность собранных данных

База данных	Характеристика доступности
CONCAWE	Публикуют периодические отчеты, которые представляют собой результаты обработки данных, содержащихся в их базе данных. Также представлена общая краткая информация об авариях, включенных в базу данных
PHMSA	Предлагает необработанные данные к загрузке с сайта Администрации по безопасности систем транспорта и взрывоопасных веществ (PHMSA) Министерства транспорта США (DOT). Ежегодно представляется краткий отчет обо всех инцидентах, включая классификацию инцидентов по причинам. Суммы ущербов также включены в публикуемые данные
NEB, AER	Публикуют периодические отчеты, которые представляют собой результаты обработки данных, содержащихся в их базе данных. Не публикуют необработанные (исходные) данные, собранные в базах данных
APIA	База данных находится в настоящее время в разработке и в процессе заполнения данными. Публичные отчеты не предоставляются
Ростехнадзор	Начиная с 2004 г. публикует ежегодные отчеты о состоянии безопасности на поднадзорных объектах, включая очень краткие данные об авариях на магистральных трубопроводах

Таблица 9

Причины аварий и их характеристики

Причины аварий	Описание причин повреждений при авариях
1. Брак	Повреждения, связанные с качеством материала (например, металлургические дефекты) или недостатками конструкции/строительно-монтажных работ (например, сварочные дефекты), а также повреждения системы уплотнений, соединений и отказ оборудования (включая и контрольно-измерительное)
2. Ошибки эксплуатации	Повреждения, связанные с нарушением требований технических регламентов по эксплуатации, обслуживанию и ремонту, нарушением работоспособности или наличием не отвечающей необходимым требованиям системы безопасности, ошибками персонала, некорректно выбранным/установленным оборудованием
3. Коррозия	Повреждения, связанные с возникновением коррозии внутренней, внешней как трубопровода, так и трубопроводной арматуры; дополнительно могут быть указаны причины корродирования (блуждающие токи, гальваническая, атмосферная, микробиологическая и др.)
4. Природные воздействия	Повреждения, связанные с природными явлениями такими, как землетрясения, сели, обвалы, оползни, наводнения, температура окружающей среды и т.д.
5. Внешнее воздействие	Повреждения, связанные с внешней деятельностью (случайной или намеренной) как третьих лиц, так и сотрудников компании-оператора или подрядной организации, также подразделяются на связанные и не связанные с земляными работами с использованием соответствующей техники и машин
6. Прочие и неизвестные причины	В том числе не вошедшие в другие категории (такие, как ошибки проекта, попадания молний и т.д.)

представляет данные о площадях разливов, о попадании разлитого продукта в водоемы и источники питьевой воды, об объемах разлитого продукта и его потерях.

Для цели настоящей публикации особый интерес представляют базы данных организаций PHMSA и CONCAWE.

Специалисты CONCAWE в большей степени уделяют внимание объемам разлитых и собранных нефтепродуктов, площадям загрязнения, а также размерам повреждений МН, но не акцентируют внимание на специфике применяемых мер обеспечения безопасности и природных особенностей местности прохождения трассы МН, что уменьшает пригодность отчетов CONCAWE [5] для использования во всесторонней оценке частот возможных аварий.

Напротив, база данных организации PHMSA [7] содержит весьма подробное описание произошедших аварий, что в достаточной степени позволяет оценить некоторые мероприятия по обеспечению безопасности, применяемые при строительстве и эксплуатации МН. База данных PHMSA обновляется каждый месяц и находится в открытом доступе на сайте PHMSA [7]. Общая протяженность МН в США, включенных в базу данных, в 2011 г. составила почти 81 тыс. км.

К преимуществам базы данных PHMSA можно отнести: большой объем статистических наблюдений; указания причин повреждений на трубопроводах, хорошая документированность и возможность детального анализа; раздельность представления информации по трубопроводам разного диаметра (при этом причины повреждений также рассматриваются по отдельности).

Все представленные в базе данных PHMSA причины аварий хорошо документированы, их можно разделить на шесть основных классов (табл. 9).

3. Анализ статистических данных министерства транспорта США — PHMSA

Как уже отмечалось ранее, PHMSA [7] публикует необработанные данные по всем авариям, которые произошли на объектах, обеспечивающих добычу, транспортировку, хранение и переработку опасных веществ. Данные относятся к промышленным, магистральным и распределительным трубопроводам как морским, так и береговым, включая насосные станции, промежуточные базы хранения, резервуарные парки, площадки узлов запорной арматуры (УЗА), которые предназначены для транспортировки опасных веществ газов и жидкостей, включая сырую нефть (crude oil), легкоиспаряющиеся жидкости (highly volatile liquids), нефтепродукты и продукты переработки (refined

products) (дизельное топливо, бензин, керосин и т. д.), двуокись углерода (т. е. другие не токсичные и не пожароопасные вещества). Несмотря на то, что сбор данных был начат с 1968 г., подробные и систематизированные данные доступны только с 1984 г. Имеющиеся статистические данные потребовали проведения предварительного отбора (см. далее раздел 3.1), а затем уже их подробного статистического анализа.

База данных формируется на основании отчетов компаний-операторов, эксплуатирующих опасные производственные объекты: отчет о произошедших инцидентах/авариях (в соответствии с формой PHMSA F 7000-1 (Rev. 12-2012)) и ежегодные отчеты о состоянии эксплуатируемых объектов (в соответствии с формой PHMSA F 7000-1.1 (Rev. 6-2011)), которые доступны на сайте PHMSA [9].

Отчеты об авариях (форма PHMSA F 7000-1) включают (но не ограничиваются) в себя весьма подробную информацию (табл. 10).

3.1. Аварии, включенные в анализ

Данные об авариях* представлены на официальном сайте PHMSA [10]. В первую очередь из всех данных были отобраны объекты — сухопутные магистральные трубопроводы, которые предназначены для транспортировки сырой нефти (crude oil). Отбирались аварии, произошедшие только на линейной части трубопроводов, включая площадки узлов запорной арматуры (УЗА) (line pipe, including valve sites).

Отдельного внимания заслуживает факт изменения критериев включения аварий в базу данных PHMSA (см. табл. 4). С 2002 г. объем минимального разлива, о котором компании-операторы обязаны подавать отчетность, был уменьшен с 8 м^3 (50 баррелей) до $0,019 \text{ м}^3$ (0,12 баррелей/19 л), что, в свою очередь, существенным образом отразилось на числе зафиксированных в базе данных аварий за этот период: зафиксировано 946 аварий за период 1984—2001 гг. и 905 — за период 2002—2009 гг. (рис. 1). При этом в период с 2002 по 2009 гг. действовала ревизия "Rev. 01-2001" формы PHMSA F 7000-1 отчета об инциденте, в соответствии с инструкциями к которой при так называемых малых разливах более $0,019 \text{ м}^3$ (0,12 баррелей/19 л), но менее $0,8 \text{ м}^3$ (5 баррелей), указывались только основные сведения об авариях: наименование организации и ее контактные данные, время и место

* В настоящем разделе для удобства изложения под аварией будет пониматься любой случай аварийной (неконтролируемой) разгерметизации МН, даже если он по тем или иным признакам может быть отнесен к инцидентам согласно классификации Федерального закона. № 116-ФЗ от 21.07.1997.



Информация об авариях

Компания-оператор	Наименование, адрес, информация о сообщившем лице, его адрес, контактные данные и др.
Авария	Время, дата, местоположение аварии, долгота, широта, город, штат, объект расположен на море или на суше
Тип объекта	Резервуар, насосная/ измерительная станция, трубопровод и др., год строительства/монтажа
Местоположение аварии на объекте	Измерительная/запорная арматура, фланец, тело трубы, насос, сварочный шов и др.
Экономические потери	Ущерб государству/частным лицам, стоимость работ по ликвидации аварий, стоимость работ по восстановлению окружающей среды, стоимость потерянного продукта
Вещество	Наименование вещества и объем, участвующего в аварии, а также объем собранного вещества при проведении работ по ликвидации
Причина	При аварии на морских/сухопутных трубопроводах: тип трубопровода (подземный/наземный, магистральный, распределительный, продуктопровод), тип повреждения, тип запорной арматуры, длина изолируемого сегмента, расстояние между задвижками, диаметр/ толщина стенки трубы, тип соединения
Окружающая среда	Дорожное покрытие, под/над землей, внутри/вне здания, котлован, под водой, другое
Последствия	Количество травмированных/умерших, взрывы/пожары
Ущерб окружающей среде	Ущерб животным, загрязнение почвы/воды
Причина — коррозия	Тип коррозии, причина возникновения, применяемые защитные мероприятия (включая и применение ингибиторов/антисептиков (биоцидов) при возможности с указанием года ввода в эксплуатацию защитного мероприятия)
Причина — природные воздействия	Движение грунта (землетрясение, оседание почвы, оползни), наводнения, температура, ураганы и др.
Причина — внешнее воздействие	Землеройные работы, вандализм, деятельность третьих лиц и др.
Причина — брак	Материал (трубы, запорной арматуры, соединения), тип сварочного шва (в стык, угловой и др.) и т.д.; данные о проведении диагностических работ, дата последних испытаний
Другая информация	Другая информация

инцидента, тип вещества, объемы разлитого и собранного вещества, причина аварийной разгерметизации, размеры ущербов оператора и третьих лиц. Такого рода информация не является репрезентативной. С 2010 г. форма PHMSA F 7000-1 снова претерпела некоторые изменения в отношении предоставляемых сведений об авариях. Кроме того, появилось одно дополнительное условие включения в базу данных аварий: если объем раз-

лива составил менее 5 баррелей и разлив произошел в результате ремонтных работ на трубопроводе, то такие случаи не включаются в базу данных, поскольку не являются аварийными. Поэтому в числе аварий в 2010—2011 гг. не отмечается такой резкий скачок общего числа аварий, как в предыдущий период (см. рис. 1).

Из приведенного выше можно сделать вывод, что причиной значительного увеличения числа аварий в 2002—2009 гг. было включение в базу данных аварий "с малыми объемами разлива" и "с малыми объемами разлива при проведении текущих ремонтных работ". Такие аварии легко выделяются из общего числа, поскольку их описание содержит весьма ограниченную информацию (так называемые "пустые").

Все зафиксированные случаи неаварийной разгерметизации МН должны быть исключены из расчета частоты аварийной разгерметизации МН. Можно предположить, что причиной аварий "с малыми объемами разлива" может быть любая из шести, приведенных в табл. 9, а аварий "с малыми объемами разлива при проведении текущих ремонтных работ" — ошибки эксплуатации и частично

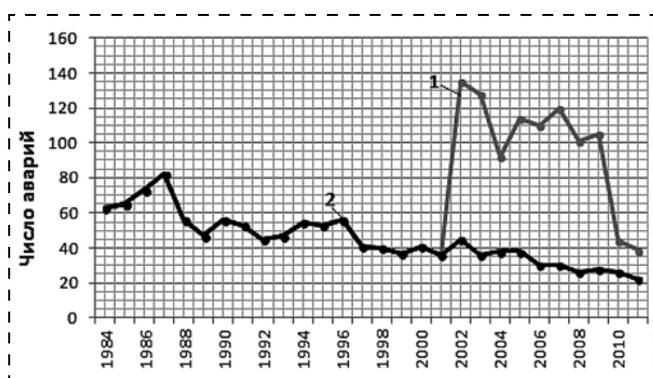


Рис. 1. Число аварий с учетом (1) и без учета (2) малых разливов в период 2002—2011 гг.

Таблица 11

Аварии по причине ошибок эксплуатации за период 2002—2011 гг.

Год	Общее число аварий по причине ошибок эксплуатации	Число "пустых" аварий	Число учитываемых аварий
2002	10	10	0
2003	10	10	0
2004	3	2	1
2005	9	8	1
2006	10	9	1
2007	6	4	2
2008	9	9	0
2009	6	5	1
2010	4	3	4
2011	1	0	1
Итого:	68	60	11

Примечание. Полужирным шрифтом выделены ячейки с числом аварий, учитываемым в дальнейшем анализе.

брак. Согласно описанию причин (см. табл. 9), нарушение требований технических регламентов (в том числе и по обслуживанию и ремонту), а также ошибки персонала, связанные с некорректно установленным оборудованием, относятся только к ошибкам эксплуатации. В табл. 11 представлены данные по числу аварий по причине ошибок эксплуатации за период 2002—2011 гг.

Учитывая данные табл. 11, а также то, что в период с 1984 по 2001 г. количество аварий в год по причине ошибок эксплуатации колеблется от 0 до 3, можно предположить, что все зафиксированные в период 2002—2009 гг. так называемые "пустые" аварии являются авариями "с малыми объемами разлива при проведении текущих ремонтных работ", вследствие чего они будут исключены из общего числа аварий "с малыми объемами разлива" за период с 2002—2011 гг.

Одной из основных причин аварий "с малыми объемами разлива" может быть брак (см. табл. 9), но вряд ли такого рода аварии могут случаться при проведении ремонтных работ. Тем не менее сравнение числа аварий по причине брака за периоды 2002—2009 гг. и 2010—2011 гг. (табл. 12) говорит о том, что аварии "с малыми объемами разлива при проведении текущих ремонтных работ" были также зафиксированы и по этой причине, поскольку числа аварий за указанные периоды времени значительно отличаются (более чем в 2 раза!). Скорее всего, уровень аварийности "с малыми объемами разлива" по причине брака в разные годы будет примерно одинаковым. Тогда в качестве допущения можно предположить, что общее число аварий

Таблица 12

Аварии по причине брака за период 2002—2011 гг.

Год	Общее число аварий по причине брака	"Число "пустых" аварий	Число, уменьшенное в 2,5 раза	Число "пустых" аварий	Число аварий с полным описанием
2002	51	43	20	12	8
2003	44	41	18	15	3
2004	34	30	14	10	4
2005	46	36	18	8	10
2006	39	36	16	13	3
2007	55	51	22	18	4
2008	46	37	18	9	9
2009	49	42	20	13	7
2010	17	11	—	—	6
2011	8	5	—	—	3
Итого:	389	332	171	114	57

Примечание. Полужирным курсивным шрифтом выделены ячейки с числом аварий, соответствующим среднему уровню аварийности по причине брака, которые учитываются в дальнейшем анализе, полужирным — также учитываемые в дальнейшем анализе

по причине брака за период 2002—2009 гг. может быть уменьшено в 2,5 раза (см. табл. 12). Это и будем считать исключением случаев не аварийной разгерметизации "с малыми объемами разлива при проведении текущих ремонтных работ" по причине брака.

В период с 2010 по 2011 г. в базе данных также присутствуют аварии с ограниченным описанием ("пустые"), но все они относятся только к авариям "с малыми объемами разлива".

Таким образом, в дальнейшем для расчета частоты аварийной разгерметизации МН (с учетом малых утечек) были отобраны аварии, произошедшие в период с 2002 по 2011 г., в том числе аварии "с малыми объемами разлива" (всего 711 аварий). Для проведения подробного анализа базы данных с целью разработки методики расчета ожидаемой частоты аварийной разгерметизации каждого участка МН, были отобраны аварии, произошедшие в период с 1984 по 2011 г., за исключением аварий "с малыми объемами разлива" и "с малыми объемами разлива при проведении текущих ремонтных работ" в период с 2002 по 2011 г. (всего 1265 аварий) (см. рис. 1, кривая 2).

Распределение отобранных аварий в зависимости от причины их возникновения представлены на рис. 2—5.

В табл. 13—15 представлено распределение выбранных аварий в зависимости от причины их возникновения в периоды 1984—2011 гг. и 2002—2011 гг.



3.2. Экспозиция МН

Частота аварийной разгерметизации МН рассчитывается делением числа аварий на экспозицию. Экспозиция — это длина трубопровода, наблюдаемая в течение какого-либо промежутка времени, измеряемая км/год. Может определяться как общая экспозиция всей транспортной системы, так и части системы, например, экспозиция трубопроводов определенного диаметра или определенной глубины залегания. Кроме того, период расчета экспозиции не обязательно может приниматься равным одному году; как правило, берутся достаточно большие промежутки времени — 5, 10, 20 лет и т. д.

Очевидно, что чем больше экспозиция трубопроводов, попавших в статистический анализ, тем более достоверной является полученная частота аварийной разгерметизации МН. Экспозиция определялась на основе ежегодных отчетов о состоянии поднадзорной трубопроводной системы (форма РНМСА F 7000-1.1) [9, 11] (табл. 16). Такого рода отчеты компании-операторы стали предоставлять только с 2004 г.

На основе анализа сводных данных по всем поднадзорным трубопроводам за период с 2004 по 2011 г. было установлено, что в среднем длина сухопутных магистральных трубопроводов, транспортирующих именно сырую нефть, составляла 26,63 % от общей длины всех трубопроводов, включенных в базу данных РНМСА. Общие же данные по длинам всех трубопроводов (вне зависимости от транспортируемого вещества), вошедшие в базу данных РНМСА [11], известны за период с 1984 г. по настоящее время.

Поэтому в дальнейшем расчет общей экспозиции всех сухопутных МН за пол-

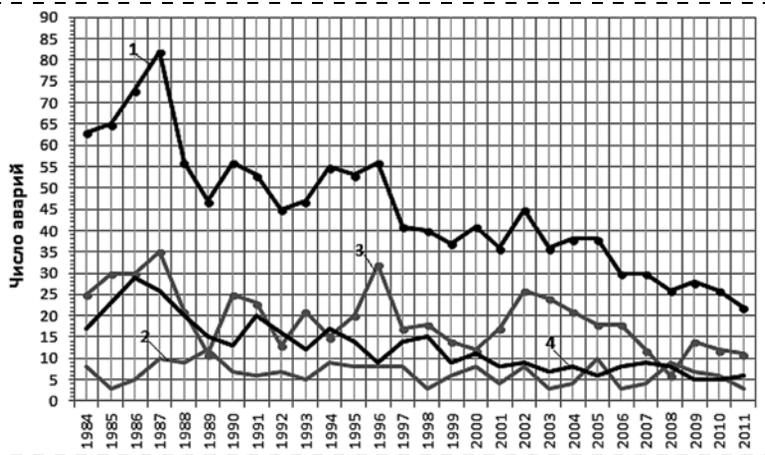


Рис. 2. Число аварий на МН (общее и в зависимости от причины) по каждому году периода наблюдений (1984—2011 г.):

1 — общее; 2 — брак; 3 — коррозия; 4 — внешнее воздействие

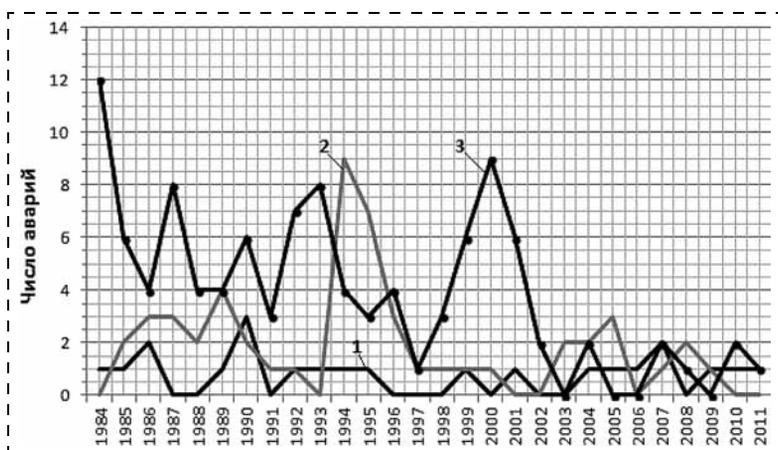


Рис. 3. Число аварий на МН (в зависимости от причины) по каждому году периода наблюдений (1984—2011 г.):

1 — ошибки эксплуатации; 2 — природные воздействия; 3 — прочие и неизвестные

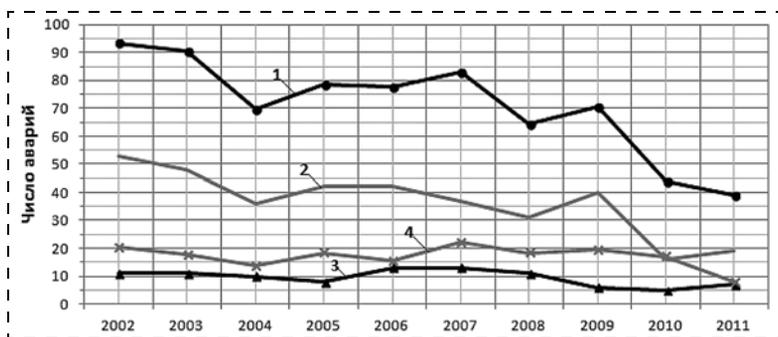


Рис. 4. Число аварий на МН (общее и в зависимости от причины) по каждому году периода наблюдений (2002—2011 г.) (с учетом малых объемов разливов):

1 — общее; 2 — коррозия; 3 — внешнее воздействие; 4 — брак

Таблица 13

Общее число аварий в зависимости от причины их возникновения (1984—2011 г.)

Причина аварии	Число аварий	%
Брак	183	14,47
Ошибки эксплуатации	22	1,74
Коррозия	541	42,77
Природные воздействия	52	4,11
Внешнее воздействие	359	28,38
Прочие и неизвестные	108	8,54
Всего:	1265	100,00

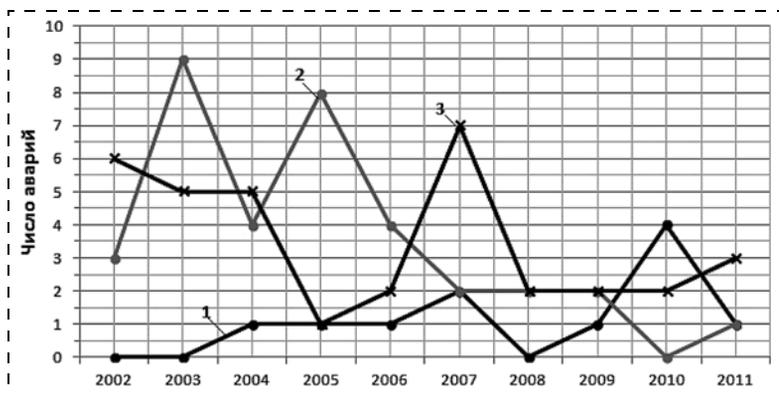


Рис. 5. Число аварий на МН (в зависимости от причины) по каждому году периода наблюдений (2002—2011 гг.) (с учетом малых объемов разливов): 1 — ошибки эксплуатации; 2 — природные воздействия; 3 — прочие и неизвестные

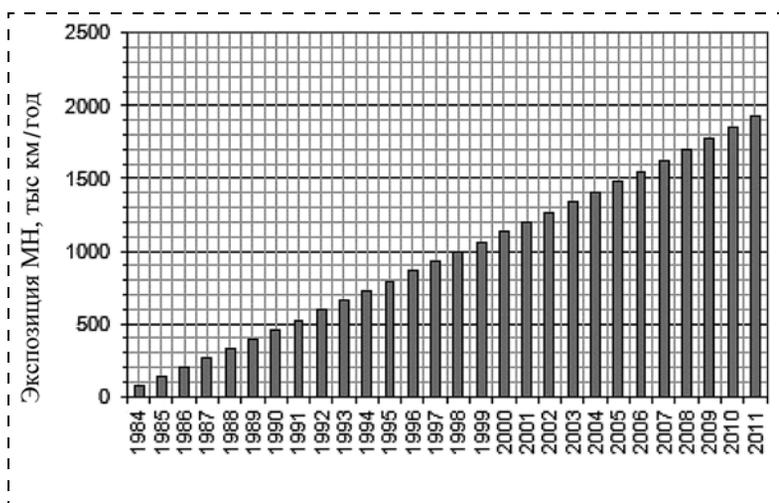


Рис. 6. Экспозиция сухопутных МН за период 1984—2011 гг.

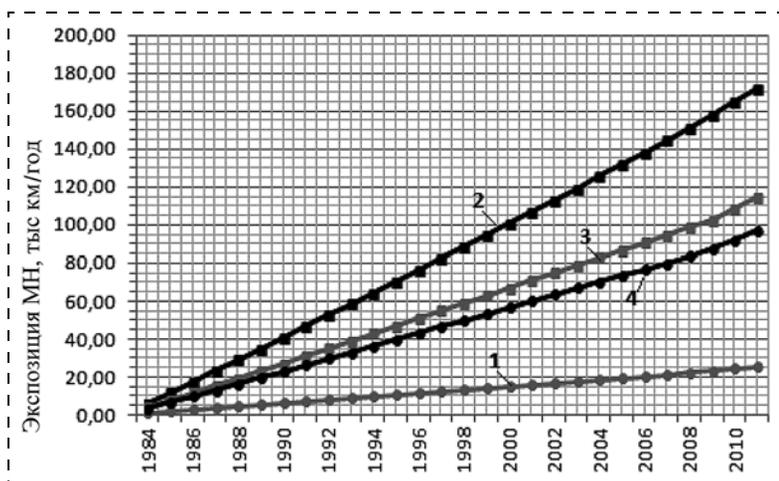


Рис. 7. Экспозиция МН за период 1984—2011 гг. в зависимости от диаметра в дюймах: 1 — 0...4; 2 — 24...28; 3 — 30...34; 4 — ≥ 36

Таблица 14

Общее число аварий в зависимости от причины их возникновения (2002—2011 гг.)

Причина аварии	Число аварий	%
Брак	57	17,87
Ошибки эксплуатации	8	2,51
Коррозия	162	50,78
Природные воздействия	11	3,45
Внешнее воздействие	71	22,26
Прочие и неизвестные	10	3,13
Всего:	319	100,00

Таблица 15

Общее число аварий в зависимости от причины их возникновения (2002—2011 гг.) с учетом малых объемов разливов

Причина аварии	Число аварий	%
Брак*	171	24,05
Ошибки эксплуатации	11	1,55
Коррозия	364	51,20
Природные воздействия	35	4,92
Внешнее воздействие	95	13,36
Прочие и неизвестные	35	4,92
Всего:	711	100,00

* Указанное выше допущение по исключению аварий "с малыми объемами разлива при проведении текущих ремонтных работ" могло несколько снизить долю аварий по причине брака, но в целом незначительно.

Таблица 16

Информация о поднадзорных МН

Компания-оператор	Наименование и адрес
Вещество	Тип транспортируемого вещества, объемы транспортируемых веществ в зависимости от типа трубопровода
Общая длина (мили)	Эксплуатируемые трубопроводы; морские/сухопутные в зависимости от диаметра, от года ввода в эксплуатацию, от наличия или отсутствия катодной защиты и антикоррозионного защитного покрытия; морские/сухопутные, сваренные электроконтактным способом (electronic resistance weld) в зависимости от декады ввода в эксплуатацию; морские/сухопутные, имеющие определенный минимальный условный предел текучести (minimum yield strength)
Другая информация	Другая информация

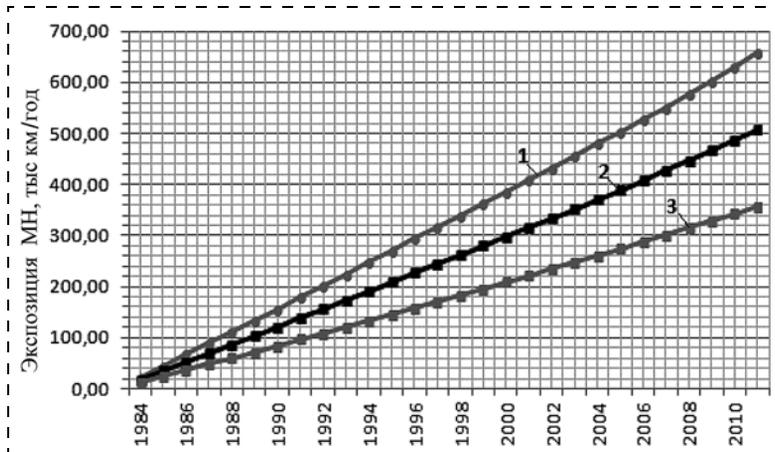


Рис. 8. Экспозиция МН за период 1984—2011 гг. в зависимости от диаметра в дюймах:
1 — 6...10; 2 — 12...16; 3 — 18...22

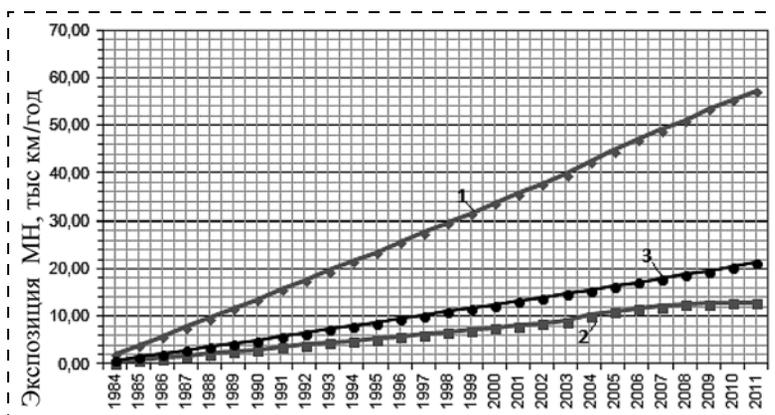


Рис. 9. Экспозиция МН, имеющих катодную защиту без антикоррозионного покрытия (1), а также трубопроводов без катодной защиты и антикоррозионного покрытия (2) и без катодной защиты с антикоррозионным покрытием (3), за период 1984—2011 гг.

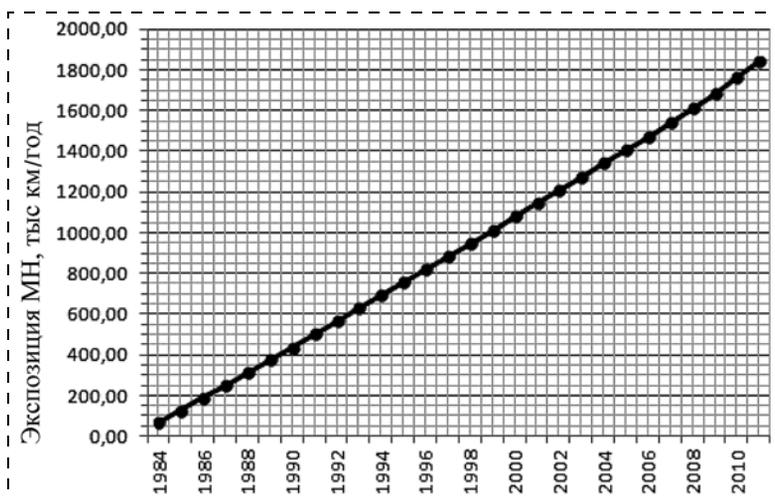


Рис. 10. Экспозиция МН, имеющих катодную защиту и антикоррозионное покрытие, за период 1984—2011 гг.

Таблица 17

Средняя доля МН определенного диаметра от общего количества сухопутных МН, включенных в базу PHMSA [11] в 2004—2011 гг.

Диаметр трубопровода, дюймы	Средняя доля, %
Менее 4	1,32
6	4,94
8	14,66
10	14,49
12	11,11
14	1,89
16	13,30
18	2,38
20	10,75
22	5,35
24	6,63
26	2,23
28	0,04
30	4,18
32	0,01
34	1,72
36	0,89
Более 36	4,11
	100,00

Таблица 18

Средняя доля МН в зависимости от наличия/отсутствия катодной защиты и/или антикоррозионного покрытия от общего числа сухопутных МН, включенных в базу данных PHMSA [11] в 2004—2011 гг.

Наличие защиты	Средняя доля, %
С катодной защитой:	
без антикоррозионного покрытия	2,98
с антикоррозионным покрытием	95,24
Без катодной защиты:	
без антикоррозионного покрытия	0,68
с антикоррозионным покрытием	1,11
	100

ный рассматриваемый период с 1984—2011 гг. (рис. 6) был выполнен с учетом указанной выше доли средней длины сухопутных МН, и на конец 2011 г. она составила 1930,5 тыс. км/год.

Аналогичным образом была определена и экспозиция сухопутных МН в зависимости от диаметра (рис. 7, 8), с учетом средней доли трубопроводов определенного диаметра (табл. 17), рассчитанной на основе отчетных данных за 2004—2011 гг.

С учетом средней доли сухопутных МН в зависимости от наличия/отсутствия катодной защиты и/или антикоррозионного

Таблица 19

Экспозиция МН в зависимости от наличия/отсутствия защитных антикоррозионных мероприятий (1984–2011 гг.)

Мероприятие	Экспозиция, тыс. км/год
С катодной защитой без антикоррозионного покрытия	57,28 (см. рис. 9)
Без катодной защиты и антикоррозионного покрытия	13,00 (см. рис. 9)
Без катодной защиты с антикоррозионным покрытием	21,33 (см. рис. 9)
С катодной защитой и антикоррозионным покрытием	1837,38 (см. рис. 10)

покрытия, полученной на основе отчетных данных за 2004–2011 гг. (табл. 18), на конец 2011 г. была определена соответствующая экспозиция (табл. 19).

Заключение

В части I настоящей работы кратко представлен сравнительный анализ доступных статистических баз данных по аварийности на МН. Анализ позволил определить наиболее подходящую статистическую базу данных для расчета частоты аварийной разгерметизации МН при проведении количественной оценки риска. Структура данных этой базы в большей степени позволяет выявить ("почувствовать") существенные закономерности в частоте и спектре аварий от реализуемых мер безопасности и в дальнейшем применять эти закономерности на практике при расчете частоты аварийной разгерметизации для любого МН. Представлены основные результаты анализа, обработки и адаптации выбранных статистических данных: произведен отбор аварий по заданным критериям, определено общее число аварий на МН в зависимости от причины их возникновения за периоды 1984–2011 гг. и 2002–2011 гг., определена общая экспозиция сухопутных МН, а также в зависимости от диаметра, наличия/отсутствия мероприятий по антикоррозионной защите за период 1984–2011 гг. Обработка указанных статистических данных позволила создать методику расчета ожидаемой частоты аварийной разгерметизации каждого участка МН, которая позволяет учесть основные реализуемые меры обеспечения безопасности и разнообразие условий прохождения трассы. Ука-

занная методика, а также пример расчета для одного из современных МН будут опубликованы в части 2 настоящей работы.

Список литературы

1. **Шавкин С. В., Черноплеков А. Н., Гостева А. В., Монахов Р. Е., Ляпин А. А.** Расчет частоты аварийной разгерметизации для количественного анализа риска современных магистральных газопроводов // Безопасность жизнедеятельности. — 2009. — № 3. — Приложение. — С. 1–24.
2. **Дополнение** к Специальным техническим условиям проекта (СТУП) "Анализ риска опасных производственных объектов проекта "Сахалин-II" "Береговые газопроводы" (док. № 5600-С-90-04-S-1001-00). Москва, январь 2007.
3. **UKOPA**, Pipeline Product Loss Incidents (1962–2004), 4th Report of the UKOPA Fault Database Management Group, Report Number R 8099, April 2005.
4. **Лисанов М. В., Савина А. В., Дятчерев Д. В., Самусева Е. А.** Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта // Безопасность труда в промышленности. — 2010. — № 7. — С. 16–22.
5. **CONCAWE**, Performance of European cross-country oil pipelines, Statistical summary of reported spillages in 2011 and since 1971, Report N. 3/13, CONCAWE, Brussels, April 2013.
6. **NEB**, National Energy Board Canada, Focus on Safety and Environment. A Comparative Analysis of Pipeline Performance 2000–2009, December 2011 (<http://www.neb-one.gc.ca/>).
7. **Annual reports and accidents/incident data for hazardous liquids of Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA) Department of Transportation (DOT) U. S.** (<http://phmsa.dot.gov/pipeline>).
8. **A Guideline "Using or Creating Incident Databases for Natural Gas Transmission Pipelines"**. Report of Study Group 3.4. 23rd World Gas Conference June 1–5, 2006 Amsterdam, the Netherlands.
9. **Формы отчетов о произошедших инцидентах/авариях и ежегодных отчетов о состоянии эксплуатируемых объектов / Forms. Accident/Incident/Annual Reporting Forms [Электронный ресурс] // PHMSA.** URL: <http://www.phmsa.dot.gov/pipeline/library/forms>. (Дата обращения: 01.07.2014).
10. **Данные об авариях / Distribution, Transmission and Liquid Accident and Incident Data [Электронный ресурс] // PHMSA.** URL: <http://phmsa.dot.gov/portal/site/PHMSA/menuitem.ebd7a8a7e39f2e55cf2031050248a0c/?vgnextoid=fdd2dfal22ald110VgnVCM1000009ed07898R CRD&vgnnextchannel=3430fb649a2dc110VgnVCM1000009ed07898RCRD&vgnnextfmt=print>. (Дата обращения: 01.07.2014).
11. **Данные по трубопроводной системе / Distribution, Transmission and Liquid Annual Data [Электронный ресурс] // PHMSA.** URL: <http://phmsa.dot.gov/portal/site/PHMSA/menuitem.ebd7a8a7e39f2e55cf2031050248a0c/?vgnextoid=a872dfa122ald110VgnVCM1000009ed07898RCRD&vgnnextchannel=3430fb649a2dc110VgnVCM1000009ed07898RCRD&vgnnextfmt=print>. (Дата обращения: 01.07.2014).



A. V. Unkovskaya, Head of Section, e-mail: anna.v.unkovskaya@gmail.com,
Gazprom SPG Vladivostok (Vladivostok-LNG Project), Ltd.

Assessment of Leak Frequency of Cross-Country Oil Pipelines (Part 1)

This article is dedicated to the assessment of leak frequency of cross-country oil pipelines based on adaptation of available incident statistics data. It consists of two parts. The Part 1 contains detailed comparative analysis of available cross-country oil pipelines incident database. The well-known incident statistics databases of various organizations of Europe and North America were included in the analysis the accumulated data of which is in open public access. The analysis made it possible to determine the most applicable incident database to perform calculations of accidental leak frequency of crosscountry oil pipelines, maximally taking into account implementable measures of industrial safety assurance, and also causes and factors contributing to incidents. The incident database managed by Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA) of the Department of Transportation of the USA (DOT) was selected. Basic principles of analysis, processing and adaptation of incident statistic data are presented, upon which the procedure of calculation of accidental leak frequency of each section of cross-country oil pipelines was formulated (Part 2). 1265 incidents which happened during the period 1984–2011, were included in the analysis.

Keywords: cross-country oil pipeline, risk analysis, quantitative risk assessment, accidental leak frequency, accident, accident frequency, incident database, incident causes, corrosion, third part activity

References

1. **Shavkin S. V., Chernoplekov A. N., Gosteva A. V., Monahov R. E., Ljapin A. A.** / Raschet chastoty avarijnoj razgertmetizacii dlja kolichestvennogo analiza riska sovremennyh magistral'nyh gazoprovodov. *Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*. 2009. N. 3. Prilozhenie. P. 1–24.
2. **Dopolnenie** k Special'nyim tehničeskim uslovijam proekta (STUP) "Analiz riska opasnyh proizvodstvennyh ob'ektov proekta "Sahalin-II" "Beregovye gazoprovody" (Doc. N. 5600-C-90-04-S-1001-00). Moskva, janvar' 2007.
3. **UKOPA**, Pipeline Product Loss Incidents (1962–2004), 4th Report of the UKOPA Fault Database Management Group, Report Number R 8099, April 2005.
4. **Lisanov M. V., Savina A. V., Djagterev D. V., Samuseva E. A.** Analiz rossijskih i zarubezhnyh dannyh po avarijnosti na ob'ektah truboprovodnogo transporta. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2010. N. 7. P. 16–22.
5. **CONCAWE**, Performance of European cross-country oil pipelines, Statistical summary of reported spillages in 2011 and since 1971, Report N. 3/13, CONCAWE, Brussels, April 2013.
6. **NEB**, National Energy Board Canada, Focus on Safety and Environment. A Comparative Analysis of Pipeline Performance 2000–2009, December 2011 (<http://www.neb-one.gc.ca/>).
7. **Annual** reports and accidents/incident data for hazardous liquids of Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA) Department of Transportation (DOT) U. S. (<http://phmsa.dot.gov/pipeline>).
8. **A Guideline** "Using or Creating Incident Databases for Natural Gas Transmission Pipelines". Report of Study Group 3.4. 23rd World Gas Conference June 1–5, 2006 Amsterdam, the Netherlands.
9. **Formy** otchetov o proizoshedshih incidentah/avarijah i ezhegodnye otchety o sostojanii jekspluatiruemyh ob'ektov / Forms. Accident/Incident/Annual Reporting Forms [Elektronnyj resurs]. PHMSA. URL: <http://www.phmsa.dot.gov/pipeline/library/forms>. (Data obrashhenija: 01.07.2014).
10. **Dannye** ob avarijah / Distribution, Transmission and Liquid Accident and Incident Data [Elektronnyj resurs]. PHMSA. URL: <http://phmsa.dot.gov/portal/site/PHMSA/menuitem.ebdc7a8a7e39f2e55cf2031050248a0c/?vgnextoid=fdd2dfal22ald110VgnVCM1000009ed07898RCRD&vgnnextchannel=3430fb649a2dc110VgnVCM1000009ed07898RCRD&vgnnextfmt=print>. (Data obrashhenija: 01.07.2014).
11. **Dannye** po truboprovodnoj sisteme / Distribution, Transmission and Liquid Annual Data [Elektronnyj resurs]. PHMSA. URL: <http://phmsa.dot.gov/portal/site/PHMSA/menuitem.ebdc7a8a7e39f2e55cf2031050248a0c/?vgnextoid=a872dfal22a1d110VgnVCM1000009ed07898RCRD&vgnnextchannel=3430fb649a2dc110VgnVCM1000009ed07898RCRD&vgnnextfmt=print>. (Data obrashhenija: 01.07.2014).

Учредитель ООО "Издательство "Новые технологии"

Журнал выходит при содействии Учебно-методического совета "Техносферная безопасность" Учебно-методического объединения вузов по университетскому политехническому образованию и Научно-методического совета "Безопасность жизнедеятельности" Министерства образования и науки Российской Федерации

ООО "Издательство "Новые технологии". 107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5397, тел./факс (499) 269-5510, e-mail: bjd@novtex.ru, <http://novtex.ru/bjd>

Телефон главного редактора (812) 670-9376(55), e-mail: rusak-maneb@mail.ru

Дизайнер Т. Н. Погорелова.

Технический редактор Е. М. Патрушева. Корректор М. Г. Джавадян

Сдано в набор 02.09.14. Подписано в печать 14.10.14. Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Заказ ВГ1114.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-3762 от 20.06.2000.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз".

Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.