

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4, 2021

Двадцать лет научной конференции “Сергеевские чтения”

О. Н. Еремина

3

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Формирование неоплейстоценовых эрозионно-аккумулятивных циклов горных рек

С. А. Несмеянов

19

Геологические закономерности образования диссипативных геологических структур – оползневых блоков

Г. П. Постоев, А. И. Казеев, М. М. Кучуков

32

Взаимосвязи между речными и подземными водами в нижнем течении реки Томь (Томская область, Российская Федерация)

О. Н. Владимирова, О. Г. Савичев

41

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Естественная радиоактивность и фоновое содержание техногенных радионуклидов в подземных водах района Ленинградской АЭС

В. А. Ерзова, С. М. Судариков, В. Г. Румынин, А. А. Шварц

53

Эколого-геохимическая обстановка Котовского района Приволжской возвышенности и оценка состояния наземных экосистем левобережья р. Медведица в условиях интенсивной техногенной нагрузки

К. Д. Светашова, М. А. Харьковина, Н. С. Грохольский

67

Влияние антропогенного загрязнения на подвижность тяжелых металлов в почвах малопромышленных городов Амурской области

Н. А. Бородина, В. И. Радомская

77

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияние дефектов систем водоотведения автомобильных дорог на изменение геосистем морских террас

С. В. Рыбальченко, А. С. Оганезов

87

Contents

Number 4, 2021

Twenty years of the scientific conference in commemoration
of academician E.M. Sergeev

O. N. Eremina

3

NATURAL AND HUMAN-INDUCED PROCESSES

Formation of Neopleistocene erosional accumulative cycles
of mountain rivers

S. A. Nesmeyanov

19

Geological regularities in the formation of dissipative
geological structures – landslide blocks

G. P. Postoev, A. I. Kazeev, M.M. Kuchukov

32

Interaction between river and subsurface water in the lower
reaches of Tom' River (Tomsk oblast, Russian Federation)

O. N. Vladmirova, O. G. Savichev

41

ENVIRONMENT CONTAMINATION

Natural radioactivity and background values of anthropogenic
radionuclides in groundwater around the Leningrad NPP area

V. A. Erzova, S. M. Sudarikov, V. G. Rumynin, A. A. Shvarts

53

Environmental and geochemical situation in the Kotovsky area,
the Volga region, and the state of surface ecosystems on the left bank
of Medveditsa River under strong anthropogenic load

K. D. Svetashova, M. A. Khar'kina, N. S. Grokhol'skii

67

Influence of anthropogenic pollution on mobility of heavy metals
in soils of low-industrial cities in Amur region

N. A. Borodina, V. I. Radomskaya

77

RESEARCH METHODS AND TECHNIQUES

Impact of errors in water drainage systems of highways on the marine
terrace geosystems

S. V. Rybal'chenko, A. S. Oganezov

87

ДВАДЦАТЬ ЛЕТ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ “СЕРГЕЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ”

© 2021 г. О. Н. Еремина^{1,*}

¹ Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000, Россия

*E-mail: sci-council@geoenv.ru

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

После доработки 05.04.2021 г.

Принята к публикации 23.04.2021 г.

Статья посвящена истории научной конференции “Сергеевские чтения”, которая ежегодно проводится в ИГЭ РАН, начиная с 1999 г, в память о выдающемся ученом инженер-геологе и грунтоведе, педагоге высшей школы и организаторе науки академике Евгении Михайловиче Сергееве (1914–1997). Конференция, утвержденная Постановлением бюро ОГГГН РАН №13100/5-49 “Об увековечении памяти академика Е. М. Сергеева”, является годичной сессией Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. В статье рассказывается об организации и проведении чтений, их участниках и почетных гостях, об изменении формата и тематики конференции за 20 лет, о торжественных юбилейных мероприятиях, организованных в рамках Сергеевских чтений разные годы.

Ключевые слова: академик Е. М. Сергеев, Сергеевские чтения, геоэкология, инженерная геология, грунтоведение, ИГЭ РАН, Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, кафедра инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ

DOI: 10.31857/S0869780921040032

Академик АН СССР и РАН, крупнейший советский и российский ученый в области грунтоведения и инженерной геологии, талантливый педагог, организатор науки и общественный деятель Евгений Михайлович Сергеев ушел из жизни в свой 83-й день рождения – 23 марта 1997 г. (рис. 1).

Евгений Михайлович оставил своим ученикам и коллегам большое наследие: на Геологическом факультете МГУ – кафедру грунтоведения и инженерной геологии (ныне – кафедра инженерной и экологической геологии), заведующим которой он был более 30 лет, а в Академии наук – Научный совет РАН по инженерной геологии, гидрогеологии и геокриологии, который возглавлял долгие годы, а также созданный по его инициативе и при его непосредственном участии Институт геоэкологии РАН (ИГЭ РАН).

Через год после этой печальной даты, ученик Е.М. Сергеева – академик Виктор Иванович Осипов, директор Института геоэкологии РАН, инициировал процедуру увековечивания имени своего учителя в Российской академии наук. По его предложению 18 марта 1998 г. было принято Постановление бюро ОГГГН РАН №13100/5-49 “Об увековечении памяти академика Е.М. Сергеева”, которое одобрило проведение ежегодной научной конференции “Сергеевские чтения” в качестве годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геоло-

гии и гидрогеологии (ниже Научный совет РАН). Было решено, что это мероприятие будет проводиться ежегодно в последней декаде марта, по возможности, в день рождения академика



Рис. 1. Академик Е.М. Сергеев (1914–1997).



Рис. 2. Председатель Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии академик В.И. Осипов на трибуне седьмых Сергеевских чтений (2005 г.).

Е.М. Сергеева, трагическим образом совпавшее с днем его кончины.

Первые Сергеевские чтения были организованы спустя год после вынесения Постановления Бюро ОГГГН РАН, 23–24 марта 1999 г., Научным советом РАН совместно с Институтом геоэкологии РАН и кафедрой инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ. Они были приурочены к 85-летию юбилею ученого. Сергеевские чтения проходили в любимой *alma mater* Евгения Михайловича, на Геологическом факультете МГУ, которому он отдал многие десятилетия своей жизни. Чтения состояли из двух частей: торжественного заседания, на котором с воспоминаниями о юбиляре выступили его коллеги и ученики; а также научной сессии, посвященной развитию научных идей академика Е.М. Сергеева. С воспоминаниями о Евгении Михайловиче выступили: ректор МГУ академик В. А. Садовничий; декан геологического факультета МГУ, член-корреспондент РАН Б.А. Соколов; зам. декана геологического факультета МГУ проф. В.А. Богословский, академик-секретарь ОГГГН РАН академик Д.В. Рундквист, вице-президент РАН академик Н.П. Лавров. Ученики Е.М. Сергеева – проректор МГУ, зав. кафедрой инженерной и экологической геологии академик РАЕН В.Т. Трофимов и директор ИГЭ РАН, академик В.И. Осипов, представили доклады о научной и организационной деятельности Е.М. Сергеева. Самыми теплыми воспоминаниями поделились его друзья, в том числе фронтовые товарищи и ученики из разных стран мира. На научной сессии были представлены доклады по крупным проблемам в инженерной гео-

логии, гидрогеологии, геокриологии, а также по новому научному направлению – геоэкологии, инициатором развития которого в рамках наук геологического цикла был Евгений Михайлович Сергеев. Среди докладчиков первых Сергеевских чтений были такие крупные ученые, как Г.А. Голлодковская, С.М. Семенов, В.С. Ковалевский, Э.Д. Ершов, В.А. Королев, В.Н. Соколов, В.Г. Шлыков, А.В. Николаев, А.Л. Рагозин, В.М. Кутепов, В.И. Макаров, В.А. Мироненко, В.П. Зверев и др. В организации первой конференции “Сергеевские чтения” от Научного совета РАН принимали участие академик В.И. Осипов (председатель оргкомитета), О.Н. Еремина (секретарь), а от кафедры инженерной и экологической геологии – одна из первых учениц Е.М. Сергеева – А.С. Герасимова. В дальнейшем, на протяжении последующих 20 лет председатель и секретарь оргкомитета ежегодных Сергеевских чтений, организуемых Научным советом РАН, оставались бессменными (рис. 2).

Идея проведения такого мероприятия – Сергеевских чтений – нашла живой отклик в научном сообществе всего постсоветского пространства. Можно смело утверждать, что после развала СССР конференция “Сергеевские чтения” стала первой попыткой восстановления разрушенных научных связей и обмена опытом между школами инженер-геологов на территории бывшего Советского Союза. В работе первых чтений приняли участие более 200 человек из России, Белоруссии, Узбекистана, Литвы. В конференции участвовали представители 39 организаций из Москвы, Санкт-Петербурга, Перми, Свердловска, Томска, Краснодара, Ставрополя, Владимира. Материалы

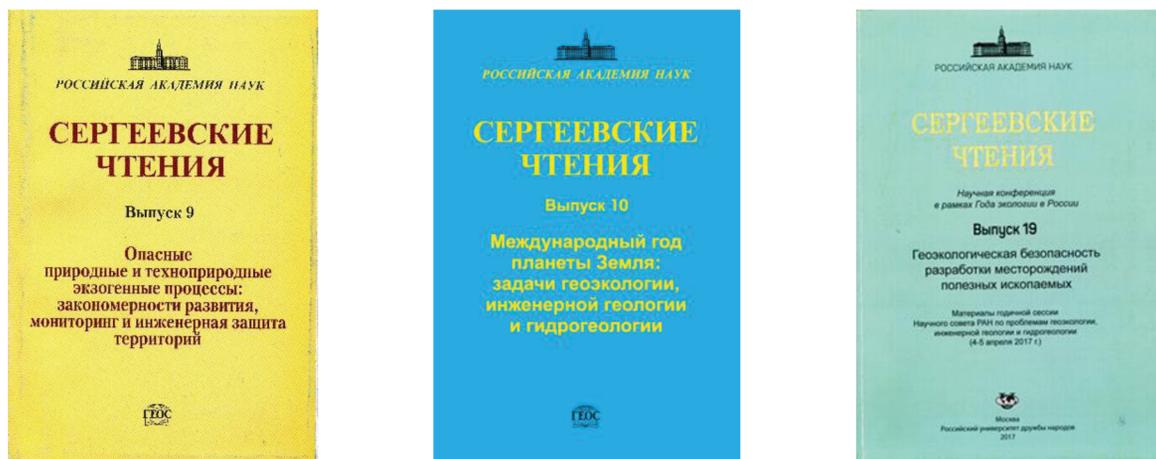


Рис. 3. Выпуски материалов Сергеевских чтений разных лет.

чтений были выпущены в издательстве МГУ в виде брошюры, куда вошли воспоминания коллег, учеников, друзей и однополчан Е.М. Сергеева (Д.В. Рундквиста, В.Т. Трофимова, В.И. Осипова, Г.В. Добровольского, В. Иодказиса, Н.Г. Мавлянова, Н.Л. Смирновой, В.С. Шибаковой, А.Ф. Воронова, М.Л. Вороновой, Р.Н. Ангеловой) [12]. Научные доклады, включенные в программу конференции, были опубликованы на страницах журнала “Геоэкология”.

Начиная со вторых Сергеевских чтений, материалы научной конференции стали регулярно выходить в свет к началу проведения этого мероприятия в виде отдельного тома – сборника научных трудов [14]. С 2000 г. по 2009 г. ежегодный том материалов чтений выпускался в Москве издательством “ГЕОС”, а с 2010 г. по настоящее время – издательско-полиграфическим комплексом РУДН. Отвечая требованиям времени, начиная с 6-го выпуска (2004 г.) материалы Сергеевских чтений включены в российскую базу научного цитирования (РИНЦ) на платформе российской научной электронной библиотеки eLibrary.ru, что, несомненно, повышает востребованность и наукометрическую привлекательность такой публикации (рис. 3).

Уже на следующий год (2000 г.) конференция Сергеевские чтения разделились на два независимых мероприятия – в МГУ им. М.В. Ломоносова проходило торжественное мемориальное заседание; а в рамках Научного совета РАН организовывалась научная сессия. Ежегодные мемориальные заседания проводились на кафедре инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ на протяжении 5 лет, с 2000 по 2004 г. Доклады о жизни и деятельности Е.М. Сергеева, его вкладе в развитие инженерной геологии, грунтоведения, науки об охране и рациональном использовании геологической среды,

представленные сотрудниками кафедры на этих заседаниях, публиковались в виде отдельных брошюр. Начиная с 2005 г., такие юбилейные мероприятия стали проводиться кафедрой совместно с ИГЭ РАН один раз в пять лет.

Научная конференция “Сергеевские чтения”, организуемая Научным советом РАН на базе ИГЭ РАН, осталась ежегодной и по сей день традиционно проводится преимущественно в форме двухдневного мероприятия. В первые годы заседание собиралось в конференц-зале ГИН РАН, но впоследствии сложилась традиция проведения чтений как годичной сессии Научного совета РАН в залах заседаний Президиума РАН. В 2017 и 2018 годах новой площадкой для проведения конференции стал Геологический музей им. В.И. Вернадского РАН.

Впервые проведенная на рубеже тысячелетий, новая регулярная научная конференция быстро завоевала признание в кругах инженер-геологов не только России, но и всего постсоветского пространства. Из года в год число участников Сергеевских чтений возрастало. В конце 1990-х–начале 2000-х гг., в переломную эпоху экономических перемен, это была по существу одна из немногих площадок для обмена научными идеями и общения в среде коллег – инженер-геологов и геоэкологов. Популярности конференции прибавлял и тот факт, что она проводилась и до сих пор проводится на безвозмездной основе, участие в ней не требует оплаты регистрационного взноса. Это уникальная отличительная особенность нашей конференции, на которой категорически настоял ее основатель и постоянный председатель оргкомитета – академик В.И. Осипов, и которую удалось сохранить, несмотря на все экономические, финансовые и организационные трудности. И сейчас, среди обилия научных мероприятий последних лет, Сергеевские чтения остаются при-

влекательными для ученых, во-первых, высоким качеством отбираемых материалов для публикации и устного оглашения, а, следовательно, высоким уровнем научной дискуссии, а во-вторых – своей открытостью для широкого круга участников, включая студентов, аспирантов и молодых ученых, работников бюджетных государственных учреждений и некоммерческих структур. Этот круг, несомненно, был бы значительно уже, если бы для участия в конференции требовалось оплата высокого регистрационного взноса. В конференции ежегодно принимают участие 200–250 человек, представляющих научные учреждения РАН, профильные вузы, научно-производственные и экспертные организации. Охват участников становится шире с каждым годом.

Научная тематика конференции отличается из года в год, соотносясь с потребностями и вызовами времени. В первые годы проведения конференции (1999–2003 гг.), научная тематика чтений была широкой, охватывавшей все основные разделы инженерной геологии и геоэкологии: грунтоведение, механику и техническую мелиорацию грунтов, геодинамику, природные и техноприродные процессы и явления, региональные проблемы, загрязнение геологической среды, проблемы урбанизированных территорий и промышленных объектов, проблемы гидрогеоэкологии и геокриологии, а также вопросы профессионального образования и развития методологии и методов научных исследований. Позднее, начиная с 2004 г., тематика конференции обновлялась, отвечая требованиям текущего момента. Выбирая тему чтений очередного года, мы, организаторы, всегда стараемся поднять наиболее острые и животрепещущие вопросы, которые стоят сегодня на повестке дня профессионального инженерно-геологического сообщества. Так, за прошедшие годы к обсуждению предлагались такие темы, как: “Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы утилизации и захоронения отходов” (2005); “Инженерно-экологические изыскания в строительстве: теоретические основы, методика, методы и практика” (2006); “Опасные природные и техноприродные экзогенные процессы: закономерности развития, мониторинг и инженерная защита территорий” (2007); “Научное обоснование актуализации нормативных документов инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий” (2010), “Инженерно-геологическое и геоэкологическое обоснование технически сложных и уникальных инженерных проектов” (2011), “Роль инженерной геологии и изысканий на предпроектных этапах строительного освоения территорий” (2012), “Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций” (2015), “Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи” (2016);

“Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых” (2017), “Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии” (2018) [3, 10]. Возникла естественная необходимость привлечения к организации таких узкотематических конференций наряду с Научным советом РАН и Институтом геоэкологии РАН других профессиональных и общественных организаций. Так, в 2010 г. соорганизатором чтений выступало ГУП Росстройизыскания; в 2012 г. – Национальное объединение изыскателей России; а в 2018 г. – Комиссия по экологии и окружающей среде Общественной Палаты РФ. Разнообразие обсуждаемых тем позволило значительно расширить состав участников конференции, привлечь в качестве почетных гостей и пленарных докладчиков ученых и специалистов из различных смежных областей знаний. Так, например, на 14-х Сергеевских чтениях (2012 г.), на которых обсуждалась роль инженерной геологии и изысканий на предпроектных этапах строительного освоения территорий, с пленарными докладами выступили президент Национального объединения изыскателей и проектировщиков (НОИЗ) Л.Г. Кушнир и советник президента НОИЗ по градостроительству В.Л. Беляев; а в работе 19-х чтений (2017 г.), посвященных вопросам геоэкологической безопасности разработки месторождений полезных ископаемых, приняли участие ведущие ученые – академики РАН в области геологии и горных наук: Ю.Н. Малышев (ГГМ РАН), К.Н. Трубецкой (ИПКОН РАН), В.В. Адушкин (ИДГ РАН), Д.В. Рундквист (ГГМ РАН), Л.А. Вайсберг (НПК “Механобртехника”) и др. [11]. Список таких примеров можно продолжать.

В ряде случаев конференция Сергеевские чтения становилась составной частью **более крупных рамочных научных и общественных событий**. Так, в 2010 г. чтения проводились в рамках Российской национальной программы Международного года планеты Земля, объявленного ООН по инициативе Международного союза геологических наук; в 2017 г. чтения были приурочены к Году экологии в России, объявленного Президентом РФ В.В. Путиным; а в 2018 г. – конференция проходила в качестве самостоятельной секции IX Международного Форума “Экология” [7, 11].

Сергеевские чтения, по своей сути, являются годичной сессией Научного Совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии – органа, объединяющего ведущих ученых и специалистов этой отрасли науки. Члены Научного Совета со всей страны съезжаются на ежегодную встречу для обсуждения накопившихся проблем; многие выступают с научными докладами по тематике очередных чтений. За 20 лет участники и слушатели конференции имели уникальную возможность прослушать докла-



Рис. 4. Президиум Вторых Сергеевских чтений: академик В.И. Осипов, проф. В.П. Ананьев, проф. В.А. Королев. Конференц-зал ГИН РАН, 2000 г.

ды выдающихся профессоров ведущих вузов страны, обменяться мнениями с лучшими профессионалами. С трибуны Сергеевских чтений неоднократно выступали Г.А. Голодковская, Г.С. Золотарев, Г.К. Бондарик, Э.Д. Ершов, В.И. Осипов, В.Т. Трофимов, В.М. Шестаков, В.А. Всеволожский, В.А. Королев, И.П. Иванов, В.А. Мироненко, В.Г. Румынин, Р.Э. Дашко, А.А. Карцев, А.Д. Потапов и другие блестящие лекторы высшей школы. В чтениях принимали участие В.Г. Шлыков, В.Н. Соколов, С.М. Семенов, В.С. Ковалевский, В.В. Баулин, А.Л. Рагозин, А.И. Шеко, Р.С. Зиангиров, И.А. Парабучев, И.С. Зекцер, В.П. Зверев, И.И. Молодых, В.М. Кутепов, В.И. Макаров, В.В. Толмачев, И.В. Дудлер, А.В. Николаев, В.М. Кнатько, В.Г. Кондратьев и многие другие выдающиеся ученые, профессионалы высшей пробы, чьи имена известны всем специалистам в области инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии. К сожалению, многих из них уже нет с нами. На протяжении многих лет до самой своей кончины в проведении заседаний неизменно участвовал профессор МГРИ-РГГРУ им. С. Орджоникидзе В.М. Швец, заместитель академика В.И. Осипова на посту председателя Научного Совета РАН. Из года в год, пока позволяло здоровье, почетным гостем конференции был профессор Ростовского государственного строительного университета В.П. Ананьев, спе-

циально приезжавший в Москву на это мероприятие из Ростова-на-Дону, несмотря на почтенный возраст (рис. 4).

Нельзя не отметить с признательностью регулярное очное участие в конференции членов Научного Совета из разных, подчас отдаленных регионов нашей страны – Екатеринбурга (О.Н. Грязнов, С.Г. Дубейковский, К.Г. Пшеничников), Перми (В.Н. Дублянский, Г.Н. Дублянская, Н.Г. Максимович, В.Н. Катаев), Хабаровска (Т.И. Подгорная), Томска (С.Л. Шварцев, В.Е. Ольховатенко, Г.М. Рогов), Иркутска (Т.Г. Рященко), Новочеркаска (Э.И. Ткачук), Архангельска (Ю.Г. Кутинов, А.И. Малов). Трудно перечислить имена всех наших коллег, из года в год старавшихся принять участие в Сергеевских чтениях, невзирая на большие расстояния и сопряженные с этим финансовые затраты. Можно с удовлетворением констатировать, что и новое поколение ученых и специалистов – инженер-геологов, в первую очередь, членов Научного Совета РАН обновленного состава, поддерживают сложившуюся традицию собираться в последней декаде марта в Москве на расширенное заседание Совета – конференцию имени Е.М. Сергеева (рис. 5).

Сергеевские чтения – научное мероприятие с международным участием. С самых первых лет



Рис. 5. Участники 11-х Сергеевских чтений в красном зале Президиума РАН. 2009 г.

оно было нацелено на восстановление и укрепление научных связей между Россией и странами ближнего зарубежья, на объединение ученых всего постсоветского пространства. На нашей конференции выступали с докладами выдающиеся ученые, лидеры в области инженерной геологии и гидрогеологии всего бывшего Советского Союза, считавшие своим долгом отдать дань памяти своего коллеги и учителя – Евгения Михайловича Сергеева. Мы искренне благодарны за участие в чтениях академику НАН Украины В.М. Шестопалову; чл.-корр. НАН Белоруссии А.В. Кудельскому; проф. В.П. Бочкареву (Казахстан), проф. К.А. Кожобаеву, Ю.Г. Алешину, И.А. Торгоеву (Кыргызстан), проф. Х.Л. Рахматуллаеву (Узбекистан), проф. Г.И. Буачидзе (Грузия), проф. Ф.Г. Габибову (Азербайджан) и многим другим.

Несмотря на то, что Сергеевские чтения проводятся преимущественно на русском языке, тем не менее, эта конференция вышла за пределы русскоязычного пространства и завоевала международное признание, стала событием интернационального масштаба. Академик Е.М. Сергеев был известен не только на территории Советского Союза, но и за его пределами. Он сыграл большую

роль в становлении и развитии Международной ассоциации по инженерной геологии и окружающей среде (International Association of Engineering Geology and the Environment), возглавлял ее на посту президента в 1978–1982 гг. Неудивительно, что его имя широко известно в международных научных кругах, а конференция, организованная в память о нем, получила заметный отклик в международном сообществе инженер-геологов. В разные годы гостями чтений из дальнего зарубежья были президент Международного союза геологических наук проф. Э. де Мульдер (Нидерланды), почетный Президент Международной ассоциации по инженерной геологии проф. М. Арну (Франция), паст-президент МАИГ проф. П. Маринос (Греция), проф. С. Иванович (Черногория), д-р К. Ангелов, д-р И. Иванов (Болгария), д-р Д. Морфельд (Швеция), проф. М. Калшоу (Великобритания) (рис. 6). [5, 8].

Начиная с 2003 г., понимая необходимость совершенствования структуры конференции и внесения новых элементов в форму ее проведения, мы дополнили традиционный формат чтений *молодежной сессией*, решив предоставить академическую трибуну молодым ученым, студентам и аспирантам. В таком варианте конференция ста-



Рис. 6. Иностранные гости Сергеевских чтений: доцент К. Ангелов (Болгария), проф. М. Арну (Франция), проф. П. Маринос (Греция) на прогулке по Москве. 2003 г.



Рис. 7. Участники молодежной сессии Сергеевских чтений с членами оргкомитета и почетными гостями в зимнем саду здания Президиума РАН. 2003 г.

ла традиционно проводится 1 раз в 5 лет (2003, 2008, 2013 гг.) [4, 5, 7]. При этом, заслушивание и обсуждение докладов молодых специалистов (возможно, в соавторстве с научными руководи-

телями) предваряется, как правило, заказными приглашенными докладами именитых ученых по ключевым научным проблемам. Возможность представить свои научные результаты широкому

академическому сообществу является хорошей стартовой площадкой для начинающих инженер-геологов и геоэкологов. Поэтому неудивительно, что такой формат конференции быстро завоевывал популярность среди студентов и преподавателей профильных вузов. Хочется с гордостью отметить, что за прошедшие 20 лет трибуна Сергеевских чтений дала своеобразную “путевку” в “большую науку” уже целому поколению молодых ученых. Можно было бы назвать многих ныне успешно работающих высокопрофессиональных специалистов, кандидатов и докторов наук, занимающих высокие посты в различных организациях, которые когда-то впервые доложили свои научные результаты на молодежной сессии Сергеевских чтений. Среди них – зам. директора ИГЭ РАН, д.г.-м.н. П.С. Микляев, ведущие научные сотрудники ИГЭ РАН к.г.-м.н. А.И. Казеев и Г.И. Батрак, ген. директор ООО “Петромоделлинг”, к.г.-м.н. А.В. Бершов, ген. директор ООО “Тингидис” Л.С. Томс, ведущий преподаватель университета Гриффит (Австралия) д-р И. Грачев, к.г.-м.н, в.н.с. Института экологических проблем Севера (г. Архангельск) Е.В. Полякова, к.г.-м.н. М.С. Чернов (МГУ) и многие другие (рис. 7).

Несмотря на прежде всего научную, профессиональную направленность докладов, принимаемых к публикации в сборнике и оглашению с трибуны Сергеевских чтений, нередко вниманию аудитории предлагаются материалы исторического, мемуарного характера, открывающие для слушателей разные аспекты деятельности академика Е.М. Сергеева. Так, в 2007 г. гостем конференции стал старший научный сотрудник Государственного исторического музея М.Г. Николаев, который представил доклад о строительстве нового здания МГУ на Ленинских горах и о роли Е.М. Сергеева (в тот период – секретарь парткома МГУ) в принятии решения руководством страны о выделении университету нового здания. В 2009 г. на страницах сборника был опубликован доклад В.С. Шибаковой “Е.М. Сергеев и международная монография “Инженерная геология Земли”, в котором рассказывалось о подготовке уникальной книги международным коллективом авторов под редакцией Е.М. Сергеева (в те годы президента Международной ассоциации по инженерной геологии) и У. Дирмана (Великобритания).

Несомненно, самыми значительными событиями за весь период проведения Сергеевских чтений стали *юбилейные конференции*, посвященные 90-, 95- и 100-летию со дня рождения Евгения Михайловича, которые были организованы соответственно в 2004, 2009 и 2014 гг. [6, 8, 9]. Эти торжественные мероприятия ожидаемо собрали наибольшее число участников, включая самый широкий круг учеников и коллег академика

Е.М. Сергеева из разных уголков России, стран СНГ и дальнего зарубежья. Юбилейные конференции традиционно готовятся силами Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН и кафедры инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ. По сложившейся традиции юбилейные чтения состоят из двух частей – мемориальной и научной, и проводятся в два дня: первый день – на Геологическом факультете МГУ, второй – в здании Президиума РАН. К юбилейным датам в дополнение к сборнику научных трудов оргкомитет Сергеевских чтений традиционно готовит и выпускает издания мемориального характера. Так, в 2004 г., к 90-летию ученого был опубликован сборник воспоминаний об академике Е.М. Сергееве [1], куда вошли материалы выступлений на Сергеевских чтениях, состоявшихся в 1999–2003 гг. в МГУ им. М.В. Ломоносова, а также собранные воспоминания коллег, соратников, однополчан в годы Великой Отечественной войны, друзей и учеников Евгения Михайловича. В ознаменование 95-летия со дня рождения Е.М. Сергеева, в 2009 г., Научным советом РАН был выпущен диск избранных научных трудов Е.М. Сергеева по проблемам грунтоведения, который включил 30 статей, написанных ученым без соавторов в период с 1946 по 1989 гг. В 2014 г. к юбилейным чтениям, посвященным 100-летию Е.М. Сергеева, силами его учеников была подготовлена целая серия материалов: книга автобиографических воспоминаний самого Евгения Михайловича “Взгляд сквозь годы” (главный редактор В.И. Осипов, составители: О.Н. Еремина, Н.Е. Сергеева) [13], избранные научные труды Е.М. Сергеева в 3-х томах на CD-дисках (составители: В.А. Королев, О.Н. Еремина), а также полная электронная версия журнала “Инженерная геология” с 1979 по 1992 г., основателем и главным редактором которого был академик Е.М. Сергеев. Большой труд по переводу в электронный формат журнала “Инженерная геология” взял на себя ученый секретарь Охотинского общества грунтоведов (г. Санкт-Петербург) д.г.-м.н. Д.Ю. Здобин, к сожалению, безвременно ушедший из жизни.

Юбилейная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Евгения Михайловича Сергеева (20–21 марта 2014 г.) стала наиболее масштабным мероприятием за всю историю Сергеевских чтений, событием не только общеуниверситетского и общеакадемического, но и поистине международного уровня. Оргкомитет конференции возглавили ректор МГУ им. М.В. Ломоносова академик В.А. Садовничий и член Президиума Российской академии наук академик Н.П. Лавров. Юбилейные мероприятия открылись торжественным заседанием на геологическом факультете МГУ, которое было посвящено воспоминаниям его коллег и учени-



Рис. 8. Участники торжественного заседания в честь 100-летия Е. М. Сергеева. Геологический факультет МГУ, 20 марта 2014 г.

ков. Большая геологическая аудитория собрала более 300 слушателей – бывших учеников академика Е. М. Сергеева, сотрудников и выпускников кафедры грунтоведения и инженерной геологии, сотрудников геологического факультета МГУ и ИГЭ РАН, многочисленных гостей из других организаций (рис. 8). Официальную часть заседания открыл ректор МГУ академик В.А. Садовничий, который поделился с собравшимися своими воспоминаниями о Евгении Михайловиче как о выдающемся ученом и организаторе науки, первом проректоре МГУ, декане геологического факультета (рис. 9). С пленарными докладами о своем учителе выступили академик В.И. Осипов и академик РАЕН В.Т. Трофимов. Разные грани этой выдающейся личности, человека большой души и таланта, были освещены в рассказах М.Л. Вороновой, ветерана Великой Отечественной войны, однополчанки Е.М. Сергеева; бывших коллег Евгения Михайловича по разным сферам его деятельности: проф. В.М. Швеца (РГГРУ), чл.-корр. РАН А.Б. Рубина (биологический факультет МГУ), проф. С.П. Горшкова (географический факультет МГУ), проф. И.В. Дудлера (МГСУ), а также учеников Е.М. Сергеева разных поколений, в том числе из зарубежных стран: доц. К.А. Ангелова (Болгария), К.А. Кожобаева, Ш.Э. Усупаева, Б.Д. Молдобекова (Кыргызстан), Х.Л. Рахматуллаева (Узбекистан) и др. (рис. 10). Все воспоминания, прозвучавшие во время тор-

жественного собрания, а также переданные в оргкомитет конференции в письменном виде, включая письма и поздравления, (Ананьев В.П., Баббаев А.Г., Березкина Г.М., Бибилова Е.В., Герасимова А.С., Григорьева С.В., Кольчугина Т.П., Ларионова Н.А., Осипов Ю.Б., Шибаква В.С., Яковлев Е.А., Дельгадо К., Ву Ф.) были позднее опубликованы Научным советом РАН в виде отдельного сборника [2].

Во второй день юбилейных мероприятий, 21 марта 2014 г., в здании Президиума РАН состоялась научная конференция 16-х Сергеевских чтений – “Развитие научных идей академика Е.М. Сергеева на современном этапе”. В рамках научной сессии было заслушано 28 научных сообщений, в том числе 5 заказных докладов: В.И. Осипов “Развитие идей Е.М. Сергеева в области грунтоведения”; В.В. Дмитриев “Таксономические аспекты классификации грунтов”; В.Т. Трофимов “Е.М. Сергеев – организатор региональных инженерно-геологических исследований. Их результаты и развитие на современном этапе”; В.А. Королев “Развитие представлений Е.М. Сергеева о геологической среде и ее роли в решении экологических проблем”; Е.А. Вознесенский, А.В. Брушков “Экспериментальные методы изучения грунтов при инженерно-геологических и геокриологических исследованиях. Состояние вопроса”. Все научные доклады, поступившие на конференцию и принятые ред-



Рис. 9. Президиум торжественного заседания в честь 100-летия Е. М. Сергеева на Геологическом факультете МГУ. Выступление ректора МГУ В. А. Садовниченко.



Рис. 10. Посещение учениками Е.М. Сергеева из разных стран его могилы на Троекуровском кладбище в Москве. Сергеевские чтения, 2014 г.

коллекцией к изданию, как оглашенные устно, так и оставшиеся за рамками устного обсуждения, опубликованы в сборнике трудов “Сергеевские чтения. Выпуск 16” [15].

На юбилейных Сергеевских чтениях 2014 г. была заложена еще одна важная традиция. К 100-летию юбилею ученого коллективы кафедры инженерной и экологической геологии МГУ и Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, поддержав инициативу, с которой выступил проф. МГСУ И.В. Дудлер, учредили *медаль Е.М. Сергеева* “За вклад в развитие инженерной

геологии”. Согласно разработанному положению, медаль Е.М. Сергеева является профессиональной наградой, которой награждаются российские и зарубежные ученые за научные достижения в области инженерной геологии. Медаль присуждается решением жюри, формируемым ее учредителями. Было решено, что медаль будет вручаться ежегодно 23 марта – в день памяти академика Евгения Михайловича. Первыми лауреатами медали Е.М. Сергеева в 2014 г. стали: проф. В.П. Ананьев, доц. К.А. Ангелов (Болгария), д.г.-м.н. В.В. Баулин, проф., д.г.-м.н. Г.К. Бондарик, проф., д.г.-м.н. И.П. Иванов, д.т.н. В.Д. Ка-

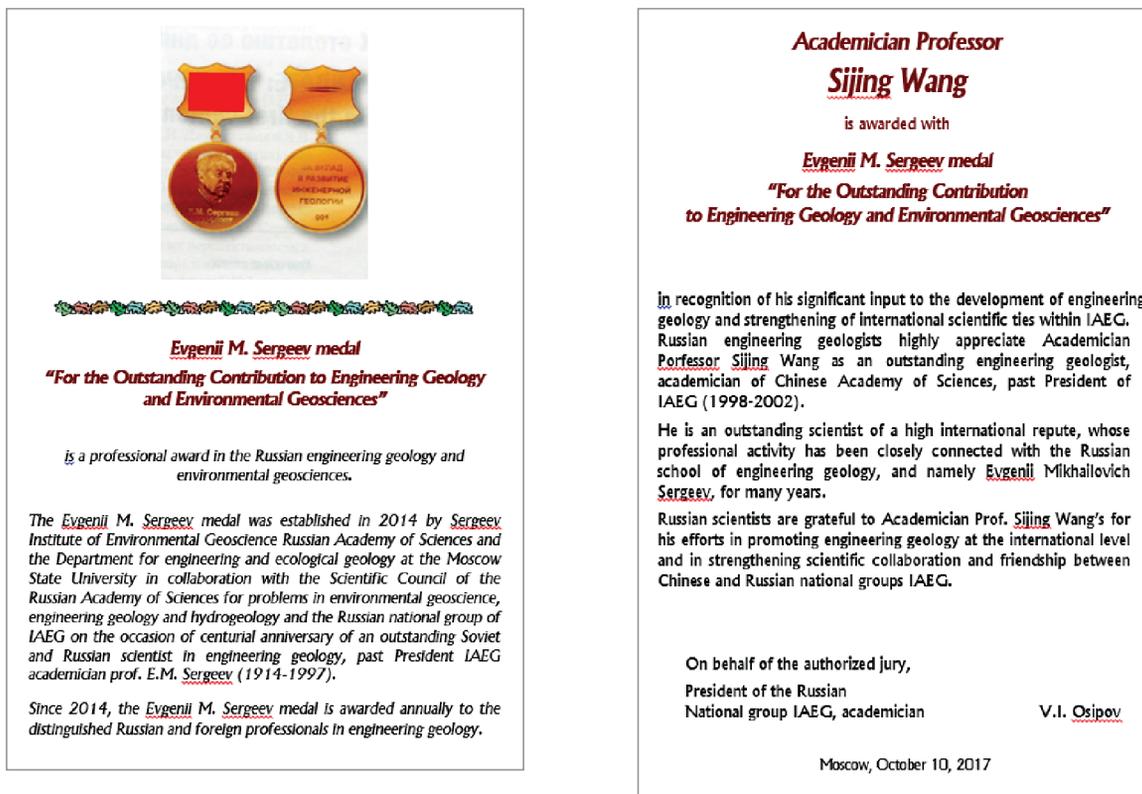


Рис. 11. Наградной лист медали Е. М. Сергеева для ее лауреата проф. Ван Сиджина, паст-Президента МАИГ (Китай).

зарновский, к.г.-м.н. Н.С. Красилова, академик В.И. Осипов, академик РАЕН В.Т. Трофимов. С тех пор, в течение последующих 6 лет медаль была вручена 31 ученому, внесшим значительный вклад в развитие науки, в том числе 3 иностранным специалистам. Кроме вышеупомянутого К. Ангелова, медалью Е.М. Сергеева в 2016 г. был награжден академик Р.Э. Ниязов (Узбекистан), а в 2017 г. ее лауреатом стал выдающийся ученый инженер-геолог из Китая, паст-Президент МАИГ проф. Ван Сиджин (рис. 11).

В 2019 г. наша конференция, если оценивать ее мерками человеческой жизни, “разменяла третий десяток”. Этот своеобразный юбилей было решено отметить изменением места проведения конференции. Как Научный совет РАН по инженерной геологии, возглавляемый Евгением Михайловичем Сергеевым, устраивал свои выездные заседания в разных городах и республиках СССР, так и сессию 21-х Сергеевских чтений было впервые решено провести вне Москвы. Конференция 2019 г., посвященная рассмотрению инженерно-геологических и геоэкологических проблем горнодобывающих регионов, была проведена в Перми, в регионе, отличающимся большим разнообразием природных условий и представляющем собой своеобразную модель всех горнопромышленных регионов страны, в котором представлено

большинство проблем горнодобывающих регионов. Площадкой для проведения конференции стал Пермский государственный научно-исследовательский университет (ПГНИУ), а его сотрудники – члены Научного совета РАН по проблемам геоэкологии взяли на себя всю тяжесть организации и проведения этого масштабного мероприятия. Со-организатором мероприятия, помимо ПГНИУ, были Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, а также Горный институт Уральского отделения РАН. Оргкомитет 21-х чтений возглавляли: В.И. Осипов – научный руководитель ИГЭ РАН, Н.Г. Максимович – зам. директора по научной работе ЕНИ ПГНИУ, заслуженный эколог РФ; член-корр. РАН А.А. Барях – директор Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН. Тема, предложенная для дискуссии на Сергеевских чтениях в 2019 г., затрагивала вопросы эколого-экономического баланса природопользования в горнопромышленных районах. Эти районы относятся к числу наиболее экологически напряженных территорий, в пределах которых идет интенсивное воздействие практически на все компоненты природной среды. Программа конференции включала следующие темы 1. Рациональное природопользование. Пути оптимизации и достижения экономической эф-



Рис. 12. Участники 21-х Сергеевских чтений. Пермь, март 2019 г.

фективности; 2. Общие проблемы экологической безопасности техногенно-нагруженных территорий; 3. Загрязнение природной среды и трансформация гидросферы в горнопромышленных районах; 4. Активизация опасных природных процессов в районах разработки месторождений полезных ископаемых; 5. Пути реабилитации техногенно-нагруженных территорий; 6. Развитие методов исследований и мониторинга трансформации природной сред [16]. На 21-х Сергеевских чтениях впервые помимо традиционных устных докладов была устроена стендовая сессия. Всего на конференции было представлено 27 устных и 19 стендовых докладов. При этом надо отметить, что из-за смены региона проведения чтений, существенно изменился круг его участников, к работе конференции были привлечены специалисты из организаций, ранее не принимавших участие в этом мероприятии. Очное участие в конференции приняли 106 специалистов из Перми, Москвы, Уфы, Екатеринбурга, Кунгура, Тулы, Томска, Архангельска, Саратова. После окончания работы сессии оргкомитет из Перми устроил для участников чтений великолепную познавательную двухдневную экскурсию по Пермскому краю с посещением знаменитой Кунгурской ледяной карстовой пещеры, которую блестяще провели Н.Г. Максимович, О.Ю. Мещерякова и О.И. Кадебская (рис. 12, 13). Все, кому посчастливилось принять участие в этом замечательном неординарном мероприятии, будут несомненно долго с благодарностью вспоминать

теплый прием, устроенный пермскими коллегами гостям 21-х Сергеевских чтений в 2019 г.

Несмотря на то, что проведение конференции традиционно, из года в год, поддерживается грантами РФФИ, Сергеевские чтения проводились и продолжают проводиться на энтузиазме, безвозмездными усилиями сотрудников ИГЭ РАН, других членов Научного совета РАН, силами учеников Евгения Михайловича, которые хотят оставить о нем добрую память у новых поколений специалистов. Многие наши коллеги в разные годы внесли неоценимый вклад в организацию этого мероприятия. Спонсорами конференции (в том числе издания сборника ее трудов и других печатных материалов) в разные годы выступали ООО «Геомассив», НПЦ «Карст» (г. Дзержинск), ЗАО ПО «Совинтервод».

В оргкомитет конференции входили и принимали активное участие в рецензировании материалов сборников видные ученые инженер-геологи, гидрогеологи и геокриологи, в том числе В.М. Кутепов, И.И. Молодых, В.П. Зверев, А.Л. Рагозин, В.И. Макаров, Г.З. Перльштейн, И.В. Галицкая, В.Г. Заиканов и другие. Слаженная четкая работа редколлегии по рецензированию поступающих докладов позволяет быстро, за несколько месяцев проводить полный цикл подготовки сборника, издавать его без задержек ко дню открытия конференции и распространять его среди участников мероприятия. Многие годы сбор и демонстрацию устных презентаций неизменно с готовностью обеспечивал зав. лаборато-



Рис. 13. Участники 21-х Сергеевских чтений на полевой экскурсии по Пермскому краю.

рией геоинформатики ИГЭ РАН О.К. Миронов. Все сотрудники ИГЭ РАН в дни проведения Сергеевских чтений работают одной дружной сплоченной командой, внося свою лепту в достойное проведение этого важного мероприятия. Можно смело утверждать, что Сергеевские чтения давно уже стали своеобразной “визитной карточкой” нашего института. А идейным вдохновителем и главным организатором этого ежегодного мероприятия в память о своем Учителе неизменно выступает академик В.И. Осипов – в прошлом директор, а ныне Научный руководитель ИГЭ РАН, председатель Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии.

“Сергеевские чтения” – это не только площадка для обмена мнениями и научных дискуссий, но и место теплых неформальных встреч старых друзей и коллег, которых когда-то объединяла школа инженерной геологии и грунтоведения Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Зачастую ученики Е.М. Сергеева, разъединенные большими расстояниями и государственными границами, с нетерпением ждут марта и специально используют эту уникальную возможность приехать в Москву для живого общения с товарищами.

Очередным ярким событием должно было стать проведение в марте 2020 г. 22-х Сергеевских чтений на тему “Геоэкологические аспекты реализации национального проекта “Экология”.

Диалог поколений”. Национальный проект “Экология” – один из государственных проектов, направленных на улучшение качества жизни в стране. Большая часть ключевых целей этого национального проекта имеет прямое отношение к вопросам геоэкологии. Среди них: эффективное обращение с отходами производства и потребления, включая ликвидацию несанкционированных свалок, повышение качества питьевой воды, создание новых особо охраняемых природных территорий, экологическое оздоровление водных объектов, сохранение уникальных водных систем и др. Чтения 2020 г. должны были сочетать заказные доклады ведущих ученых с молодежной сессией. Был собран и издан сборник трудов конференции [17], полностью сформирована ее устная программа. Мы, организаторы, старались привнести новые элементы в традиционный формат чтений. Был подготовлен конкурс среди молодых ученых на лучший доклад с награждением призами в разных номинациях; продумана сувенирная продукция, подготовлено слайд-шоу с фото Сергеевских чтений за 20 лет. Мы рассчитывали на долгожданную традиционную встречу с друзьями и коллегами из разных стран и городов России. Однако этим планам не суждено было осуществиться – помешала мировая пандемия коронавируса, объявленная накануне запланированного открытия конференции. Тем не менее, мы твердо уверены, что вынужденный перерыв в работе Сергеевских чтений будет недолгим, что традиция их проведения возобновится, и наша

конференция будет жить, вновь проводиться ежегодно на благо развития инженерной геологии и геоэкологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воспоминания об академике Е.М. Сергееве (к 90-летию со дня рождения) / Под ред. В.И. Осипова и В.Т. Трофимова. М.: ГЕОС, 2004. 230 с.
2. Воспоминания об академике Е.М. Сергееве (к 100-летию со дня рождения) / Под ред. В.И. Осипова. М.: РУДН, 2015. 180 с.
3. Еремина О.Н. О годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии – “Сергеевские чтения” // Геоэкология. 2007. № 5. С. 474–476.
4. Еремина О.Н. Пятнадцатые Сергеевские чтения “Устойчивое развитие: задачи геоэкологии (инженерно-геологические, гидрогеологические и геокриологические аспекты)” (21–22 марта 2013 г., г. Москва) – молодежная сессия” // Геоэкология. 2013. № 5. С. 471–474.
5. Осипов В.И., Румянцева Н.А., Еремина О.Н. Пятые “Сергеевские чтения” (годичная сессия Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (Москва, 24–25 марта 2003 г.) // Геоэкология. 2003. № 6. С. 567–568.
6. Осипов В.И., Румянцева Н.А., Еремина О.Н. Шестые “Сергеевские чтения” – Юбилейная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения академика Е.М. Сергеева (Москва, 23–24 марта 2004 г.) // Геоэкология. 2004. № 5. С. 474–476.
7. Осипов В.И., Еремина О.Н. Десятые Сергеевские чтения. “Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии” // Геоэкология. 2008. № 5. С. 477–480.
8. Осипов В.И., Еремина О.Н. Одиннадцатые Сергеевские чтения – юбилейная конференция, посвященная 95-летию со дня рождения Е.М. Сергеева // Геоэкология. 2009. № 5. С. 477–480.
9. Осипов В.И., Еремина О.Н. Юбилейная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Евгения Михайловича Сергеева // Геоэкология. 2014. № 5. С. 471–474.
10. Осипов В.И., Еремина О.Н. Семнадцатые Сергеевские чтения “Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций” // Геоэкология. 2015. № 5. С. 469–472.
11. Осипов В.И., Еремина О.Н. Девятнадцатые Сергеевские чтения “Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых” // Геоэкология. 2017. № 5. С. 91–94.
12. Первые Сергеевские чтения. Доклады и выступления на юбилейном заседании 23 марта 1999 г., посвященном 85-летию со дня рождения академика Е.М. Сергеева / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 1999. 40 с.
13. Сергеев Е.М. Взгляд сквозь годы. Воспоминания. / Под ред. В. И. Осипова. М.: ГЕОС, 2014. 480 с.
14. Сергеевские чтения. Вып. 2. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (23–24 марта 2000 г.). М.: ГЕОС, 2000. 360 с.
15. Сергеевские чтения. Вып. 16. Юбилейная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Е.М. Сергеева / Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Развитие научных идей академика Е.М. Сергеева на современном этапе. М.: РУДН, 2014. 674 с.
16. Сергеевские чтения. Вып. 21. Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (2–4 апреля 2019 г.) / Под ред. В.И. Осипова, Н.Г. Максимова и др., Пермь: Пермский гос. ун-т, 2019. 629 с.
17. Сергеевские чтения. Вып. 22. Геоэкологические аспекты реализации национального проекта “Экология”. Диалог поколений. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (24 марта 2020 г.) М.: РУДН, 2020. 424 с.

TWENTY YEARS OF THE SCIENTIFIC CONFERENCE IN COMMEMORATION OF ACADEMICIAN E.M. SERGEEV

O.N. Eremina^{a,#}

^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#] *E-mail: sci-council@geoenv.ru*

The article describes the history of scientific conference “Sergeev’s readings”, which is held annually at the Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS. This conference is organized since the year of 1999 in commemoration of academician E.M. Sergeev, who was an outstanding scientist in engineering geology and soil and rock engineering, a remarkable higher school lecturer, and a recognized research leader (1914–1997). The conference approved by the Resolution of RAS Division on Geology, Geochemistry, Geophysics and Mining №13100/5-49 “About immortalization of the name of academician E.M. Sergeev” is simultaneously an annual session of the Scientific Council RAS on the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology. The paper tells about different aspects of the preparation and arrangement of

meetings, their participants and honorable guests, varying topics and structure of the conference during 20 years, as well as jubilee festival events organized in the framework of Sergeev’s readings in different years.

Keywords: *academician E.M. Sergeev, Sergeev’s readings, environmental geoscience, engineering geology, soil and rock engineering, IEG RAS, Scientific Council RAS on the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology, department of engineering and ecological geology at the Geological Faculty MSU*

REFERENCES

1. *Vospominaniya ob akademike E.M. Sergeeve (k 90-letiyu so dnya rozhdeniya)* [Reminiscences about academician E.M. Sergeev. (To the 90th birthday)]. *Osipov, V.I., Trofimov, V.T.*, Eds. Moscow, GEOS Publ., 2004, 230 p. (in Russian)
2. *Vospominaniya ob akademike E.M. Sergeeve (k 100-letiyu so dnya rozhdeniya)* [Reminiscences about academician E.M. Sergeev. (To the centenary anniversary)]. *Osipov, V.I.*, Ed. Moscow, RUDN Publ., 2015, 180 p. (in Russian)
3. Eremina, O.N. *O godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii – “Sergeevskie chteniya”* [About the annual session of the Scientific Council RAS on the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology – Sergeev’s readings]. *Geoekologiya*, 2007, no. 5, pp. 474–476. (in Russian)
4. Eremina, O.N. *Pyatnadsatye Sergeevskie chteniya “Ustoichivoe razvitiye: zadachi geoekologii (inzhenerno-geologicheskije, gidrogeologicheskije i geokriologicheskije aspekty)- molodezhnaya sessiya* [Fifteenth Sergeev’s readings “Sustainable development: tasks in geocology (engineering geological, hydrogeological and geocryological aspects) – young professionals’ session]. *Geoekologiya*, 2013, no. 5, pp. 471–474. (in Russian)
5. Osipov, V.I., Rumyantseva, N.A., Eremina, O.N. *Pyatye Sergeevskie chteniya (godichnaya sessiya Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii – Moskva, 24–24 marta 2003 g.* [The fifth Sergeev’s readings (the annual session of the Scientific Council RAS on the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology – Moscow, March 24–25, 2003)]. *Geoekologiya*, 2003, no. 6, pp. 567–568. (in Russian)
6. Osipov, V.I., Rumyantseva, N.A., Eremina, O.N. *Shestye Sergeevskie chteniya – Yubileinaya konferentsiya, posvyashchennaya 90-letiyu so dnya rozhdeniya akademika E.M. Sergeeva (Moskva, 23–24 marta 2004 g.)* [The sixth Sergeev’s readings – the Jubilee conference devoted to the 90th anniversary of academician E.M. Sergeev (Moscow, March 23–24, 2004)]. *Geoekologiya*, 2004, no. 5, pp. 474–476. (in Russian)
7. Osipov, V.I., Eremina, O.N. *Desyatye Sergeevskie chteniya. Mezhdunarodnyi god planety Zemlya: zadachi geoekologii, inzhenernoi geologii* [The tenth Sergeev’s readings. The international year of the planet Earth: tasks in environmental geoscience and engineering geology]. *Geoekologiya*, 2008, no. 5, pp. 477–480. (in Russian)
8. Osipov, V.I., Eremina, O.N. *Odinnadsatye Sergeevskie chteniya – yubileinaya konferentsiya, posvyashchennaya 95-letiyu so dnya rozhdeniya E.M. Sergeeva* [The eleventh Sergeev’s readings – the jubilee conference devoted to the 95th birthday of E.M. Sergeev]. *Geoekologiya*, 2009, no. 5, pp. 477–480. (in Russian)
9. Osipov, V.I., Eremina, O.N. *Yubileinaya konferentsiya, posvyashchennaya 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika E.M. Sergeeva* [The jubilee conference devoted to the centenary anniversary of academician E.M. Sergeev]. *Geoekologiya*, 2014, no. 5, pp. 471–474 (in Russian)
10. Osipov, V.I., Eremina, O.N. *Semnadsatye Sergeevskie chteniya “Inzhenerno-geologicheskije i geoekologicheskije problem gorodskikh aglomeratsii* [The seventeenth Sergeev’s readings “Engineering geological and geocological problems in the development of urban agglomerations]. *Geoekologiya*, 2015, no. 5, pp. 469–472 (in Russian)
11. Osipov, V.I., Eremina, O.N. *Devyatnadsatye Sergeevskie chteniya “Geoekologicheskaya bezopasnost’ razrabotki mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh”* [The nineteenth Sergeev’s readings “Geocological safety upon the development of mineral deposits]. *Geoekologiya*, 2017, no. 5, pp. 91–94 (in Russian)
12. *Pervye Sergeevskie chteniya. Doklady i vystupleniya na yubileinom zasedanii 23 marta 1999 g., posvyashchennom 85-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Sergeeva* [The first Sergeev’s readings. Reports and speeches at the jubilee meeting on March 23, 1999, devoted to the 85th birthday of academician E.M. Sergeev]. *Trofimov, V.T.*, Ed. Moscow, MGU Publ., 1999, 40 p. (in Russian)
13. *Sergeev, E.M. Vzglyad skvoz’ gody. Vospominaniya* [The sight through years. Reminiscences]. *Osipov, V.I.*, Ed., Moscow, GEOS Publ., 2014, 480 p. (in Russian)
14. *Sergeevskie chteniya. Vyp. 2. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii (23–24 marta 2000 g.)* [Sergeev’s readings. Issue 2. Proceedings of the annual session of the Scientific Council RAS on the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology (March 23–24, 2000)]. Moscow, GEOS Publ., 2000, 360 p. (in Russian)
15. *Sergeevskie chteniya. Vyp. 16. Yubileinaya konferentsiya, posvyashchennaya 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika E.M. Sergeeva. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii. Razvitiye nauchnykh idei akademika E.M. Sergeeva na sovremennom etape* [Sergeev’s readings. Issue 16. The jubilee conference devoted to the centenary anniversary of academician E.M. Sergeev. Proceedings of the annual session of the Scientific Council RAS on the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology. Development of E.M. Sergeev’s scientific ideas at the contemporary stage]. Moscow, RUDN Publ., 2014, 674 p. (in Russian)

16. *Sergeevskie chteniya. Vyp. 21. Ekologo-ekonomicheskii balans prirodopol'zovaniya v gornopromyshlennykh regionakh. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii (2–4 aprelya 2019 g.)* [Sergeev's readings. Issue 21. Ecological and economic balance in nature use in the mining industrial regions. Proceedings of the annual session of the Scientific Council RAS on the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology (April 2–4, 2019)]. Osipov, V.I., Maksimovich, N.G., Eds. Perm, Perm State Univ. Publ., 2019, 629 p. (in Russian)
17. *Sergeevskie chteniya. Vyp. 22. Geoekologicheskie aspekty realizatsii natsional'nogo proekta "Ekologiya". Dialog pokolenii. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii (24 marta 2020 g.)* [Sergeev's readings. Issue 22. Geoenvironmental aspects in implementation of the national project "Ecology". Dialogue between generations. Proceedings of the annual session of the Scientific Council RAS on the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology (March 24, 2020)]. Moscow, RUDN Publ., 2020, 424 p. (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.4551.79

ФОРМИРОВАНИЕ НЕОПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ ЦИКЛОВ ГОРНЫХ РЕК

© 2021 г. С. А. Несмеянов^{1,*}

¹ *Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН),
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия*

**E-mail: voa49@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.03.2021 г.

После доработки 05.04.2021 г.

Принята к публикации 13.04.2021 г.

Представление о строении эрозионно-аккумулятивных циклов террасообразования горных рек последовательно усложняется по мере накопления новых материалов и появления оригинальных идей. Сначала оно было дополнено выделением четырех последовательных стадий формирования аллювия: инстративной, субстративной, констративной и перстративной стадиями. Позднее пришло понимание, что граница эрозионной и аккумулятивной фаз цикла проходит внутри субстративной стадии, а граница разновозрастных циклов – внутри перстративной стадии. Эрозионная фаза делится на подфазы углубляющей и боковой эрозии. Подфаза углубляющей эрозии объединяет конец перстративной и начало инстративной стадий. Подфаза боковой эрозии, определяющая ширину днища долины, относится к субстративной стадии. Узкий инстративный врез переуглубляет субстративное днище долины. Основная часть аллювия формируется на констративной стадии. Глубина эрозионного вреза определяется величиной орогенического импульса, а ширина вреза – водобильностью, имеющей климатическую природу. Преимущественное развитие углубляющей эрозии совпадает с похолоданием и горным оледенением, а максимум потепления – с субстративной стадией. При прогрессирующем орогенезе в горных долинах формируется тыловая террасовая лестница. Возраст ее ступеней определяет время прекращения углубляющей эрозии и консервации этого участка долины. Долинные ледники переползают со ступени на ступень, и их фронтальные морены фациально замещаются разновозрастными флювиогляциальными и аллювиальными отложениями.

Ключевые слова: *терраса, эрозионно-аккумулятивный цикл, эрозионная и аккумулятивная фазы, подфазы углубляющей и боковой эрозии, инстративная, субстративная, констративная, перстративная стадии формирования аллювия, тыловая террасовая лестница*

DOI: 10.31857/S086978092104007X

ВВЕДЕНИЕ

Представление о роли и природе эрозионно-аккумулятивной цикличности в формировании горных долин имеет длительную историю. Исходной можно считать идею В. Пенка о строении террасовых “лестниц”, которая активно развивалась у нас в стране С.С. Шульцем, Н.П. Васильковским, Ю.А. Скворцовым, Н.П. Костенко и другими исследователями. Особенно плодотворными оказались воззрения Ю.А. Скворцова [18], который полагал, что каждая региональная терраса имеет индивидуальные черты распространения и строения, свойственные долинам определенного этапа развития гидросети, т.е. самостоятельной “террасовой долине”. А история развития рельефа горной области сводится, по его мнению, главным образом к истории ее гидросети. Эти представления еще в 30–50-х годах прошлого века легли в основу стратификации и

корреляции террасовых образований Средней Азии и других регионов. Они же были использованы Н.П. Костенко [2] для создания оригинальной методики картирования эрозионных террасовых образований. На основе всех этих достижений было проведено мелкомасштабное картирование террасовых образований и построение палеореконструкций горного рельефа ряда регионов Средней Азии [11, 19, 20 и др.].

Все упомянутые построения опираются на суждения об этапности развития горного рельефа как о смене ряда последовательных эрозионно-аккумулятивных циклов. Между тем понимание деталей строения таких циклов неоднозначно, как неоднозначны мнения о коррелируемых геоморфологических уровнях и строении верховьев крупных горных рек, особенно занятых долинными ледниками. А такое понимание необходимо не только для правильного возрастного расчленения

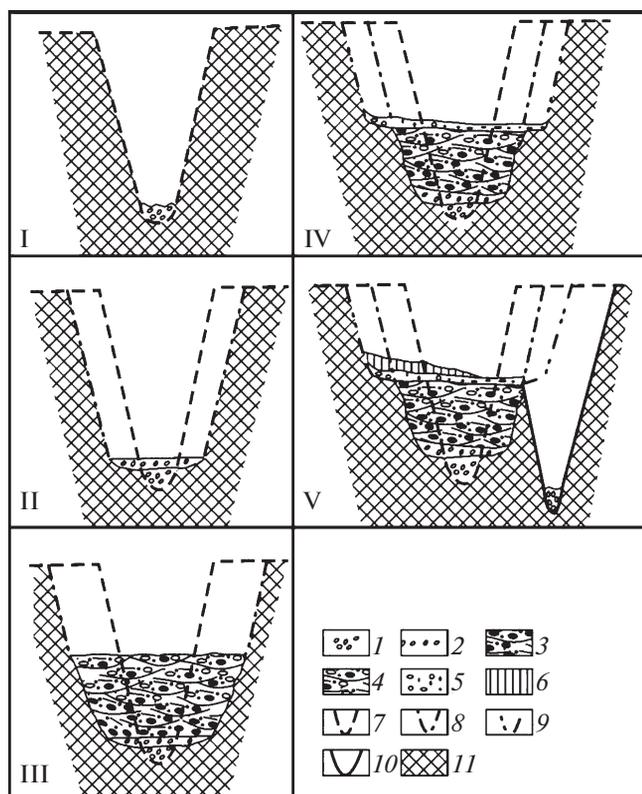


Рис. 1. Схема последовательности формирования цикловой террасы (по [12] с небольшими изменениями). Стадии: I – инстративная, II – субстративная, III – констративная, IV – перстративная, V – инстративная следующего цикла.

1 – галечно-валунные отложения с глинисто-песчаным заполнителем, 2 – базальные бурые конгломераты и валунные галечники, 3 – серовато-бурые крепко сцементированные линзовидно-слоистые конгломераты и галечники, 4 – буровато-серые слабо сцементированные конгломераты и галечники, 5 – серые рыхлые (сыпучие) галечники с песком, 6 – пролювиально-делювиальные покровные отложения, 7–10 – контуры эрозионных врезов разных стадий цикла: 7 – инстративной, 8 – субстративной и констративной, 9 – перстративной, 10 – инстративной следующего цикла; 11 – коренной коколь.

горного рельефа и анализа новейших тектонических структур, но и для расчета поэтапных орогенных движений и проведения детальных количественных реконструкций палеорельефа.

Цель настоящего исследования – уточнение стадийности и природы эрозионно-аккумулятивной цикличности и ее влияния на типизацию террасовых уровней в горных долинах.

СТАДИИ РАЗВИТИЯ ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ ЦИКЛОВ ГОРНЫХ РЕК

Представления о простой смене эрозионной фазы фазой аккумулятивной в эрозионно-акку-

мулятивном цикле горных рек уже давно трансформировались в более сложную схему, согласованную с последовательным формированием инстративного, субстративного, констративного и перстративного аллювия в соответствующие последовательные стадии развития такого цикла (рис. 1) [4, 6, 7]. В этой схеме намечены сложные сочетания эрозионных и аккумулятивных элементов в эрозионной и аккумулятивной подфазах эрозионно-аккумулятивного цикла [12, 14, 15]. Основной материал для описываемых далее построений опирается преимущественно на изучение горных рек Средней Азии.

Инстративная стадия определяется максимальной глубинной эрозией, когда днище узкого (у крупных рек шириной до 50–150 м) вреза выполняется тальвеговым аллювием – валунно-галечными плохо сортированными и окатанными, рыхлыми или слабо и неравномерно сцементированными отложениями с большим содержанием гравийно-песчано-сулинистого заполнителя. Слоистость груба или не просматривается. Отмечаются хаотические текстуры, свойственные осадкам бурных потоков, сконцентрированных в узких ущельях. Формирование данной толщи отвечает завершению главной эрозионной фазы эрозионно-аккумулятивного цикла.

Субстративная стадия определяется активацией боковой эрозии (“речной абразии”), формирующей широкое (до 1 км и более) плоское днище главного эрозионного вреза, на котором отлагается базальный маломощный (0.5–4 м), крепко сцементированный конгломерат с галькой разной степени окатанности и малым содержанием песчано-суглинистых фракций. Стадия отвечает динамическому равновесию между эрозионной и аккумулятивной фазами одного эрозионно-аккумулятивного цикла. В ней подстадия преобладания боковой эрозии должна относиться к эрозионной фазе, а подстадия накопления базального аллювия – к аккумулятивной фазе. Но на самом деле эти подстадии практически одновременны.

Констративная стадия характеризуется преимущественной аккумуляцией и знаменуется выполнением главного эрозионного вреза мощной (у больших рек до 30–150 м) толщиной ритмичного чередования крупно-, средне- и мелкогалечных слоев с преимущественно средней и хорошей окатанностью гальки и разной степенью ее цементации. В каждом ритме базальные крупно- и среднегалечные слои имеют большую мощность, чем верхние мелкогалечные и песчано-гравийные. К верхам ритма обычно ослабевает цементация, и улучшается проницаемость слоев. Боковая эрозия блуждающего по пойме русла незначительна. Но и она иногда создает небольшие уступы (“заплички”) в коренных бортах долины,

которые можно рассматривать в качестве своеобразных террас врезывания. Однако они образуются при восходящем (аккумулятивном) движении русла, которое в процессе осадконакопления поднимается над цоколем днища эрозионного вреза. А поэтому данные террасы могут считаться террасами “*восходящего врезывания*”, в отличие от обычных террас врезывания, которые формируются при углубляющей эрозии и, соответственно, именуется террасами “*нисходящего врезывания*”. О малой интенсивности боковой эрозии свидетельствует незначительная примесь местного склонового материала среди “транзитной” хорошо окатанной гальки. Констративная стадия отвечает основной части аккумулятивной фазы эрозионно-аккумулятивного цикла. Ритмичность осадконакопления свидетельствует о том, что данная фаза указанного цикла сама состоит из серии циклов более высокого порядка или порядков.

Перстративная стадия отвечает динамическому равновесию, когда русловая аккумуляция в долине завершается накоплением маломощного (2–3 м) хорошо окатанного и промытого (т.е. почти лишенного глинистых фракций) галечника с гравийно-песчаным заполнителем. Слой формируется в процессе боковой миграции русла, когда перемываются верхи аллювия констративной стадии. При этом часто возможно развитие боковой эрозии с некоторым, а иногда и значительным расширением долины на уровне кровли аллювиального чехла цикловой террасы. К этой же стадии относится и формирование серии сближенных по высоте террас “*нисходящего врезывания*”, которые обычно вложены в констративный аллювий. Перстративная стадия динамического равновесия располагается на рубеже двух смежных эрозионно-аккумулятивных циклов. Поэтому она может считаться “*межцикловой*” в отличие от “*внутрицикловой*” субстративной стадии динамического равновесия.

В перстративной “*межцикловой*” стадии естественно обособляются две подстадии. Первая подстадия, в которую активизируется боковая эрозия, и накапливается верхний слой перстративного аллювия, связана с завершением аккумулятивной фазы предшествующего эрозионно-аккумулятивного цикла. Вторая подстадия, которой отвечают террасы “*нисходящего врезывания*”, знаменует уже начало эрозионной фазы следующего цикла.

Таким образом, рассматриваемая 4-членная схема руслового осадконакопления в каждом эрозионно-аккумулятивном цикле включает две основные и две переходные стадии. Соответственно аккумулятивная фаза начинается со второй подстадии субстративной стадии, включает всю констративную стадию и первую подстадию

перстративной стадии. Эрозионная фаза начинается с формирования локальных террас “*нисходящего врезывания*”, т.е. со второй подстадии перстративной стадии, включает образование глубокого эрозионного вреза с инстративным аллювием и завершается активизацией боковой эрозии на первой подстадии субстративной стадии.

Поскольку в горных долинах глубина узкого вреза, как правило, в несколько раз превышает мощность выполняющего его аллювия всех четырех перечисленных выше стадий, время его формирования с учетом “пропиливания” прочного цоколя, по-видимому, соизмеримо с продолжительностью каждой из этих стадий. Это “пропиливание” осуществляется бурным водотоком при истирающем участии валунно-галечного тальвегового аллювия, который начинает образовываться, очевидно, с момента завершения свободного меандрирования русла, т.е. с прекращением отложения перстративного аллювия на террасах “*нисходящего врезывания*”. Однако в разрезе цикловой террасы сохраняется инстративный (тальвеговый) аллювий только последнего геологического “мгновения” глубинной эрозии.

Поскольку переходная стадия динамического равновесия начинается с активизации боковой эрозии и расширения долины, реальный геоморфологический профиль каждого эрозионно-аккумулятивного цикла имеет более сложное строение, чем в схеме, предложенной в 30-х годах прошлого века С.С. Шульцем [21, 22] и включающей борт и днище вреза. Днище (площадка) главного эрозионного вреза часто осложнено небольшим узким переуглублением, выполненным инстративным аллювием, а борта (склоны) главного вреза – перегибами на уровне кровли аллювия, перекрытыми перстративным аллювием или покровными отложениями.

Следует отметить, что в горных долинах пойменный аллювий, представленный тонкослоистыми песками, супесями и суглинками, обычно не образует сплошного покрова, а развит спорадически на перстративном аллювии или образует линзы в констративном аллювии [4, с. 100]. В констративном аллювии он обычно завершает седиментационные циклы. Их анализ может дать ключ к детальной корреляции аллювиальных толщ.

Некоторыми авторами подчеркивается, однако, хотя и ритмичный, но линзовидный характер слоистости констративного аллювия, ее образование объясняется влиянием блуждающих разветвленных русловых протоков [4, с. 98]. Но эта линзовидность лишь маскирует основную цикличность руслового осадконакопления. Поэтому при достаточно хорошей обнаженности констративного аллювия, в нем удастся проследить пачки слоев, отвечающие седиментационным циклам.

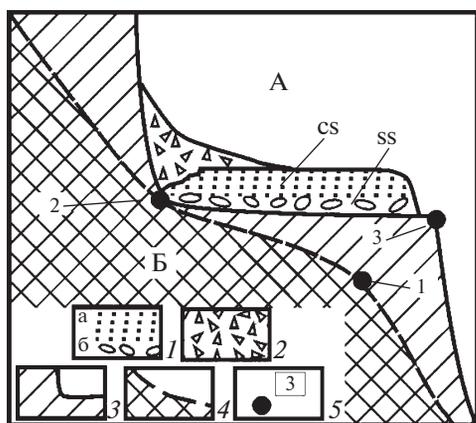


Рис. 2. Сопоставление геоморфологических профилей: А – исходной террасы, Б – современного перегиба на эрозионном гребне.

1 – аллювий: а – констративный (cs), б – субстративный (ss); 2 – склоновые гравитационные отложения; 3 – коренные породы склона и цоколя террасы; 4 – коренные породы, слагающие эрозионный гребень; 5 – точки перегибов склона: 1–2 – на террасовидном останце (1 – бровка, 2 – тыловой перегиб), 3 – бровка цоколя террасы.

Последние нередко разделяются поверхностями размыва, свидетельствующими о приостановках седиментации, т.е. кратковременных второстепенных фазах динамического равновесия с активизацией боковой эрозии. При этом иногда образуются упоминавшиеся выше “заплечики” в бортах заполняемого аллювием широкого эрозионного вреза (террасы “восходящего врезывания”).

ТИПИЗАЦИЯ РАЗНОРОДНЫХ ТЕРРАСОВЫХ УРОВНЕЙ В ГОРНЫХ ДОЛИНАХ

Из предшествующего изложения следует, что рассмотренная выше схема строения эрозионно-аккумулятивного цикла предусматривает существование в горных долинах террасовых уровней разной природы и значимости.

Главными считаются региональные (или цикловые) террасы, формирующиеся в результате проявления всех 4-х основных стадий эрозионно-аккумулятивного цикла. Поскольку аллювий инстративной стадии сохраняется локально, типичным является разрез, в котором на практически горизонтальном цоколе залегают разнородный аллювий: сначала субстративный, затем констративный и местами варианты перстративного.

Было также показано, что в бортах горных долин могут локально сохраняться восторепенные террасовые уровни различной природы. Поэтому при геоморфологическом расчленении и корреляции необходимо отличать от региональных (цикловых) террас *три типа дополнительных тер-*

расовых уровней, формирующихся в разные фазы эрозионно-аккумулятивного цикла:

1) *террасы “нисходящего врезывания”* с перстративным аллювием, образованные при смещении меандра вниз по долине во время начавшегося сужения долины в самом начале эрозионной фазы главного эрозионно-аккумулятивного цикла;

2) *“уровни расщепления” региональных террас*, обусловленные проявлением иерархической цикличности эрозионного расчленения рельефа, т.е. террасы с инстративным аллювием, отвечающие стадийности углубления долины в основной части эрозионной фазы главного цикла;

3) *террасы “восходящего врезывания”* с констративным аллювием, образованные планацией, аккумулятирующих (аккумулятивно воздымающихся) русел.

Террасы “нисходящего врезывания” образуются, очевидно, преимущественно при эрозии относительно рыхлых толщ аккумулятивного чехла цикловой террасы, когда углубляющееся русло сохраняет еще более или менее широкую пойму и способно смещать по ней свои меандры. Врезаясь в более прочные породы, особенно в цоколь, русло концентрируется, либо спрямляясь, либо образуя врезанные (“мертвые”) меандры. В этих условиях и формируются “уровни расщепления”.

Террасы “восходящего врезывания”, являясь элементом строения самой цикловой террасы, имеют высотную последовательность (чем выше, тем моложе), обратную последовательности остальных региональных и локальных террас (чем выше, тем древнее).

МЕТОДИКА КОРРЕЛЯЦИИ ТЕРРАСОВЫХ УРОВНЕЙ В ГОРНЫХ ДОЛИНАХ

Рассмотренная выше стадийность формирования каждого эрозионно-аккумулятивного цикла позволяет уточнить традиционную методику восстановления исходных террасовых уровней на геоморфологических профилях и их дальнейшей корреляции. Дело в том, что при подобной корреляции на эрозионных гребнях в рельефе бортов горных долин по аналогии с хорошо сохранившимися террасами обычно используется бровка современного террасовидного останца (точка 1 на рис. 2). Но если использовать данные о строении исходных террас, этот перегиб оказывается существенно заниженным по отношению к первоначальной бровке цоколя террасы (точка 3 на рис. 2).

В большом числе реальных обнажений хорошо сохранившихся террас в узких горных долинах, цоколь, перекрываемый субстративным аллювием (ss на рис. 2), обычно практически горизонтален. Даже при значительных перекосах долин,

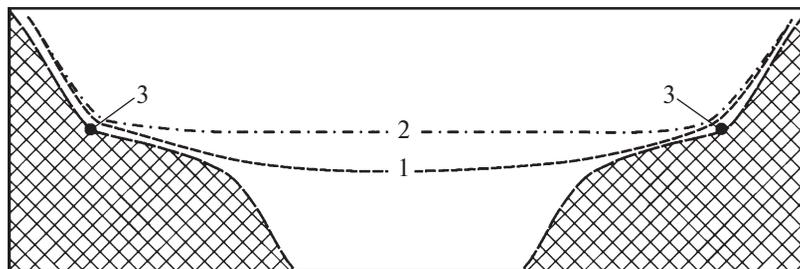


Рис. 3. Соотношение традиционного (1) и рекомендуемого (2) вариантов трассировки днщ палеодолины; 3 – точки тылового перегиба склона.

днища древних террасовых уровней оказываются наклонены незначительно (редко с уклонами порядка 0.01). Поэтому использование бровок на сильно денудированных гребнях дает существенно искаженную информацию о современном положении древних террасовых уровней.

Если сравнить исходное положение террасового уровня и обычно встречающиеся его древние останцы (см. рис. 2), то окажется, что наиболее достоверную информацию о современном положении цоколя древней террасы несет перегиб между останцами борта и днища эрозионного вреза (точка 2 на рис. 2) на картах возрастного расчленения рельефа.

Именно этот перегиб целесообразно использовать при реконструкциях палеорельефа [17]. Правда для особенно широких и длительно формировавшихся долин допускается, что такой перегиб может располагаться на уровне констративного аллювия (с) в центре подобной долины. Но эти центральные части таких широких древних долин практически никогда не сохраняются в современном рельефе и не используются при реальной геоморфологической корреляции террасовых образований. А в их прибортовых частях эти перегибы также близки к цоколям в подошве субстративного аллювия, как и в относительно узких долинах. Поэтому при геоморфологической корреляции древних террасовых уровней рационально использовать именно тыловые перегибы, отвечающие сочленению борта эрозионного вреза с его днищем (рис. 3). Сказанное относится в первую очередь к реконструкциям относительно узких долин. Днища широких долин могут прогибаться за счет неравномерности вертикальных тектонических движений.

Следует также отметить, что при оценке глубин поэтапных эрозионных врезов используется именно днище обычно картируемого широкого (субстративного) вреза и не учитывается его переуглубление, выполненное инстративным аллювием.

ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКОГО И КЛИМАТИЧЕСКОГО ФАКТОРОВ НА СТАДИЙНОСТЬ ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ ЦИКЛОВ

Связь эрозионных фаз эрозионно-аккумулятивных циклов с тектоническими импульсами в орогенах принимается большинством исследователей. Как указывает Н.И. Маккавеев [8], ведущее значение тектонического фактора по сравнению с климатическим в развитии продольного профиля реки и формировании ее террас подтверждено гидрологическими наблюдениями и экспериментами. Именно прогрессивные представления об эрозионно-аккумулятивных циклах, производных от циклов тектонических, позволили уже к началу 60-х годов прошлого века создать четырехчленные региональные стратиграфические схемы неоплейстоцена и голоцена Средней Азии и Казахстана, хорошо коррелирующиеся между собой с помощью геоморфологических методов [11, 19, 20 и др.].

Детальная корреляция эрозионно-аккумулятивных циклов с тектоническими и климатическими циклами невозможна без анализа иерархии и соотношения их фаз. Исследования в этом направлении еще только начинаются. Но уже получены обнадеживающие результаты, на которых следует остановиться.

Особенности строения рассмотренных выше динамических фаз (стадий формирования) горного аллювия позволяют уточнить соотношение эрозионно-аккумулятивного цикла с тектоническим и климатическим циклами (табл. 1) [15].

Как уже отмечалось, границу смежных эрозионно-аккумулятивных циклов, отвечающую началу фазы глубинной эрозии, целесообразно совместить с рубежом подстадий преобладания боковой и глубинной эрозии в перстративной стадии, а границу эрозионной и аккумулятивной фаз внутри цикла – с началом накопления субстративного аллювия, т.е. с серединой субстративной стадии.

Тектонический цикл в эпоху орогенеза начинается фазой активизации воздыманий. Нарушая

Таблица 1. Схема соотношения фаз эндогенной и экзогенной цикличности неоплейстоцена Средней Азии (заливка — активные фазы циклов)

Тектонические циклы	Проявления эрозионно-аккумулятивного цикла		Проявления климатического цикла				Горно-ледниковый цикл
	Эрозия	Аллювий в цикловой террасе	В аллювии		Фазы увлажнения	Температурные фазы	
Фазы	окраска	карбонатность	окраска	карбонатность	Фазы увлажнения	Температурные фазы	Фазы
активная	серая	слабая	серая	слабая	?	холодная	наступления
?							
пассивная	буровато-серая	умеренная			аридная	теплая	отступления
	бурая	интенсивная					
?	желто-бурая	слабая			плuviальная	холодная	наступления
активная	серая	слабая	серая	слабая	?		
?					аридная		

профиль равновесия, активизация воздыманий очень скоро находит отражение в приостановке аккумуляции и активизации глубинной эрозии. Тем не менее, самое начало повышения тектонической активности может несколько опережать начало глубинной эрозии. Но и сама эта эрозия начинается не мгновенно по всей долине, а развивается регрессивно (“пятящаяся эрозия”) вверх по долине. Однако в областях дифференцированных поднятий регрессивная эрозия начинается не только от главного базиса эрозии или края орогена, но и от фаса каждого относительно активнее воздымающегося блока или складки [10, с. 138]. Поэтому нельзя исключать, что начало тектонической активизации хотя и может отвечать еще концу аккумулятивной фазы, по крайней мере, началу ее перстративной стадии, но вряд ли это опережение будет более значительным.

Климатический цикл обычно проявляется в колебаниях температуры и увлажненности. Рубежи этих производных циклов могут не совпадать между собой, и не исключено, что в разных регионах планеты характер их соотношения меняется. Имеющийся материал, по-видимому, представляет для Средней Азии и прилегающих областей, а некоторые исследователи допускают синхронность климатических изменений во всей афро-азиатской части пустынного пояса северного полушария [9, с. 11].

Для разновозрастного аллювия Средней Азии отмечается однотипность изменения окраски при смене стадий аккумуляции. У инстративного аллювия окраска желто-бурая, у субстративного – бурая, у констративного – серовато-бурая, а у перстративного – серая. Поскольку красноватые и бурые окраски традиционно считаются показателями теплого климата, а серые – холодного, указанная последовательность смены окрасок интерпретируется как принадлежность инстративного, субстративного и констративного аллювия к теплой фазе, т.е. межледниковьям и интерстадиалам, а перстративного – к холодной [4]. При этом максимум красноватости и потепления приходится на время накопления субстративного аллювия, а завершение холодной стадии происходило, очевидно, перед накоплением сохранившегося в разрезе цикловой террасы инстративного аллювия. Следовательно, холодная фаза температурного цикла значительной своей частью и, очевидно, максимумом совпадала с углубляющей эрозией эрозионной фазы эрозионно-аккумулятивного цикла. Эта холодная фаза лишь незначительно захватывала своим началом самый конец аккумулятивной фазы эрозионно-аккумулятивного цикла, т.е. первую подстадию перстративной стадии. В таком случае холодная фаза температурного цикла оказывается весьма сближенной с активной фазой тектонического цикла [12, 14].

Карбонатная цементация, максимальная у субстративного аллювия и значительная у констративного, интерпретируется как показатель теплого и сухого, т.е. аридного климата. Как показали палеоклиматические исследования верхнего плейстоцена и голоцена Северной Африки и Юго-Западной Азии, влажные (плювиальные) фазы были более короткими, чем аридные, и соответствовали преимущественно эпохам распада ледниковых покровов в субарктическом и умеренном климатических поясах. А в периоды максимального разрастания таких покровов в примыкавшем к перигляциальной зоне пустынном поясе устанавливался, вероятно, прохладный, но сухой климат. Межледниковья также были преимущественно сухими [9, с. 11]. Поэтому эпоха накопления перстративного аллювия вряд ли была влажной.

Рассматривая сохранившиеся в рельефе эрозионные врезы с учетом схемы стадийности аллювиальной седиментации, приходится констатировать, что в пределах каждого эрозионно-аккумулятивного цикла в горных областях эти врезы формируются двустадийно. В каждой эрозионной фазе следует выделять две разобщенных подфазы: подфазу углубления вреза и подфазу расширения вреза. Эти подфазы имеют разную природу и значительную продолжительность.

Подфаза углубления эрозионного вреза имеет в основном тектоническую природу и развивается за счет увеличения уклонов русла рек после каждого орогенического импульса и соответствующего значительного повышения “живой силы” воды при увеличении скорости руслового потока (в формуле учитывается квадрат скорости). Такой поток стремился к восстановлению профиля равновесия за счет активизации глубинной эрозии. Эта подфаза начинается в конце перстративной стадии формирования аллювия и заканчивается в конце эрозионной фазы инстративной стадии. Данная подфаза углубления эрозионного вреза длительна, поскольку она сопровождается размывом значительного массива скальных пород, служащих цоколем аллювиальных накоплений. Величина поэтапного вреза в горных долинах оценивается для позднеплейстоценовых врез несколько десятками метров, а у среднеплейстоценовых – сотнями метров. Глубина таких врезов многократно, часто на порядок величин превышает мощность аллювиальных отложений.

Подфаза углубления эрозионного вреза отвечает в основном холодной фазе климатического цикла или смежным частям холодной и теплой климатических фаз. В аридной зоне она завершается также плювиальной фазой, повышающей дополнительно и водообильность этого потока. Орогенический импульс, частично предшество-

вавший началу активизации глубинной эрозии, скорее всего, более или менее совпадал с перстративной и зарождением инстративной аллювиальными стадиями и с холодной температурной фазой.

Вторая *подфаза расширения вреза* за счет боковой эрозии, наступает после завершения инстративной аккумуляции и практически одновременно с накоплением субстративного аллювия. В это время максимум потепления, очевидно, сопровождался повышением водности рек за счет активизации таяния долинных ледников.

Расширение первоначально узкого эрозионного вреза (подфазы углубления) начинается после завершения орогенического импульса и достижения рекой профиля равновесия. В этот геологический момент русловой поток в разных тектонических блоках, которые он пересекает, располагался на эрозионном ложе наиболее активных поднятий или на инстративном аллювии разной мощности в блоках, воздымавшихся менее интенсивно. Мощность инстративного аллювия изменяется от 1–5 до 30–40 м, а в некоторых случаях достигает и более 80 м [7, с. 6, 8]. Это различие соответствует, очевидно, величине дифференцированности в воздымании блоков на данном этапе орогенеза. Но оно, как правило, многократно меньше общего воздымания при соответствующем импульсе орогенеза.

Расширение эрозионного вреза в поперечном сечении долины осуществляется по практически горизонтальному коколю. И это расширение реализуется одновременно с началом отложения относительно маломощного преимущественно валунно-галечного субстративного аллювия (его обычная мощность 1–4 м [7, с. 6]). Грубость и характер сортировки данного аллювия свидетельствуют о большой мощности и концентрации водного потока. Увеличение мощности водотока, как уже было сказано выше, определялось таянием ледника при потеплении климата.

Сразу после завершения отложения инстративного аллювия данный водный поток еще следовал вдоль оси долины и был практически прямолинейен. Этот поток мог осуществлять боковую эрозию за счет своего искривления. Как указывал И.С. Шукин [23, с. 238], *“экспериментальные исследования М.А. Великанова [1] показали, что меандры образуются даже водотоком, текущим первоначально в прямолинейном русле”* за счет поперечной циркуляции. Считается также, что начало меандрирования обуславливается и случайными обстоятельствами — отклонениями потока препятствиями, неровностями дна или впадением боковых притоков [24, с. 13–14]. При этом сказывается прямая зависимость радиуса кривизны излучин от мощности водотока [23, с. 244], а интенсивность боковой эрозии значительно усиливает-

ся, когда водоток ориентирован косо к борту долины, особенно на повороте в вершине излучины. Здесь увеличение живой силы потока в среднем составляет 50%, а в редких случаях почти удваивается [24, с. 13]. На форме расширения эрозионного вреза в период формирования субстративного аллювия сказывается и обычный процесс смещения всей системы излучин реки вниз по долине [23, с. 247]. Это смещение обуславливают *“циркуляционные течения на изгибе русла и своеобразное распределение поступательных скоростей по живому сечению потока при его повороте”* [24, с. 30]. *“Следствием подобного распределения скоростей в верхнем крыле излучины является эрозия внутреннего (выпуклого) берега и наращивание внешнего, а в нижнем крыле, наоборот, — аккумуляция у внутреннего и подмыв внешнего берега. Поэтому вся излучина перемещается вниз по реке”* [там же].

Расширение днища долины в подфазу активизации боковой эрозии также, как и в подфазу углубляющей эрозии, сопровождалось эрозией значительного массива скальных горных пород и потому не могло быть кратковременным.

Таким образом, углубление эрозионного вреза в горных долинах имело в основном тектоническую (орогеническую) природу, а расширение вреза и формирование его картируемого ныне днища — климатическую. Данная схема, с одной стороны, подтверждает единство тектоно-климатической этапности орогенического рельефообразования [11, 14], а с другой — свидетельствует о не простом чередовании эрозионной и аккумулятивной фаз эрозионно-аккумулятивного цикла, а о более сложном чередовании подфаз этих фаз.

Ледниковые фазы горного и равнинно-материкового оледенений совпадали не полностью. Неоплейстоценовые материковые ледниковые щиты Северной Евразии исчезали в межледниковья, а крупные горно-долинные ледники только сокращались. Но фазы наступания и равнинных, и горных ледников, очевидно, отвечали холодным фазам климатического цикла. Значит, у горных ледников эти фазы хотя бы частично совпадали с подфазой углубления эрозионного вреза.

ВАРИАНТЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ ЦИКЛОВ В СТРОЕНИИ ВЕРХОВЬЕВ ГОРНЫХ ДОЛИН

Важным, но недостаточно проработанным вопросом является представление о строении верховьев крупных горных долин, особенно занятых горными ледниками. В современных учебных пособиях для полуоткрытых долин (долин, начинающихся эрозионным цирком и заканчивающихся в другой реке или водоеме) обычно предлагает-

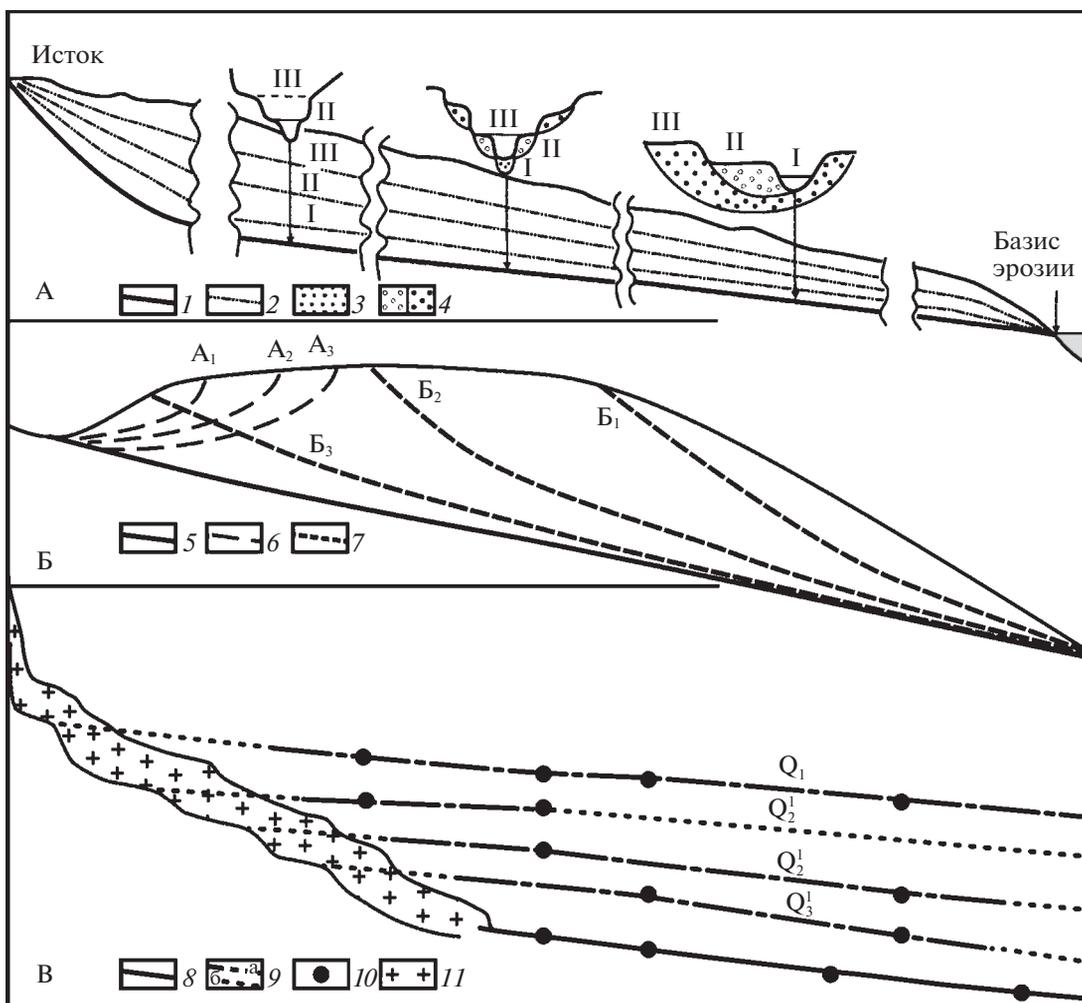


Рис. 4. Варианты строения продольного профиля речных долин: А, Б (по [3] с упрощениями): А – изменение строения полукрытой долины от истока до базиса эрозии; Б – развитие эпигенетической открытой долины. В – долина верховий р. Зеравшан с тыловой террасовой лестницей занятой ледником (по С.А. Несмеянову, [16]).

На А: 1 – современное русло реки, 2 – уровни региональных цикловых долин (I–III); 3–4 – на поперечных профилях – разновозрастные толщи аллювия: 3 – современные, 4 – древние.

На Б: 5–7 – уровни: 5 – современного русла реки, 6–7 – цикловых долин в пределах развивающегося локального поднятия: 6 – агрессивной реки (Б₁–Б₃), 7 – реки, развивавшейся медленнее (А₁–А₃) и ныне перехваченной.

На В: 8 – современное русло реки, 9 – террасовые уровни: а – достоверно установленные, б – предполагаемые; 10 – точки геодезических измерений, 11 – Зеравшанский ледник.

ся два варианта строения верховий речных террасовых рядов (рис. 4) [3, с. 219].

Первый вариант (А) представляет собой веер террас, начинающийся в точке истока и раскрывающийся вниз по долине. Этот вариант, очевидно, считается стандартным. Второй вариант (Б) с веером террас, раскрывающимся вверх по долине, характеризует развитие эпигенетической открытой долины [23]. По Н.П. Костенко [3, с. 219]: “На склонах возвышенностей реки развиваются регрессивно, их верховья растут вверх”. Н.П. Костенко специально отмечала, что в варианте развития эпигенетической долины (см. рис. 4Б) “может произойти сближение рек, продвигающихся

навстречу друг другу. На таком участке начинается борьба за область питания. Эта борьба всегда решается однозначно – в пользу реки, обладающей большей живой силой. Последняя определяется преимущественно величиной превышения верховья над устьем. Так, более агрессивная река Б в процессе своего развития (Б₁, Б₂, Б₃) может захватить область питания, а иногда и исток реки А, которая развивается медленнее (А₁, А₂, А₃). В итоге осуществляется перехват реки А рекой Б и образование общего стока”.

Такой вариант в принципе возможен, но он характерен для относительно небольших водотоков, расчлняющих своей эрозией уже существующие

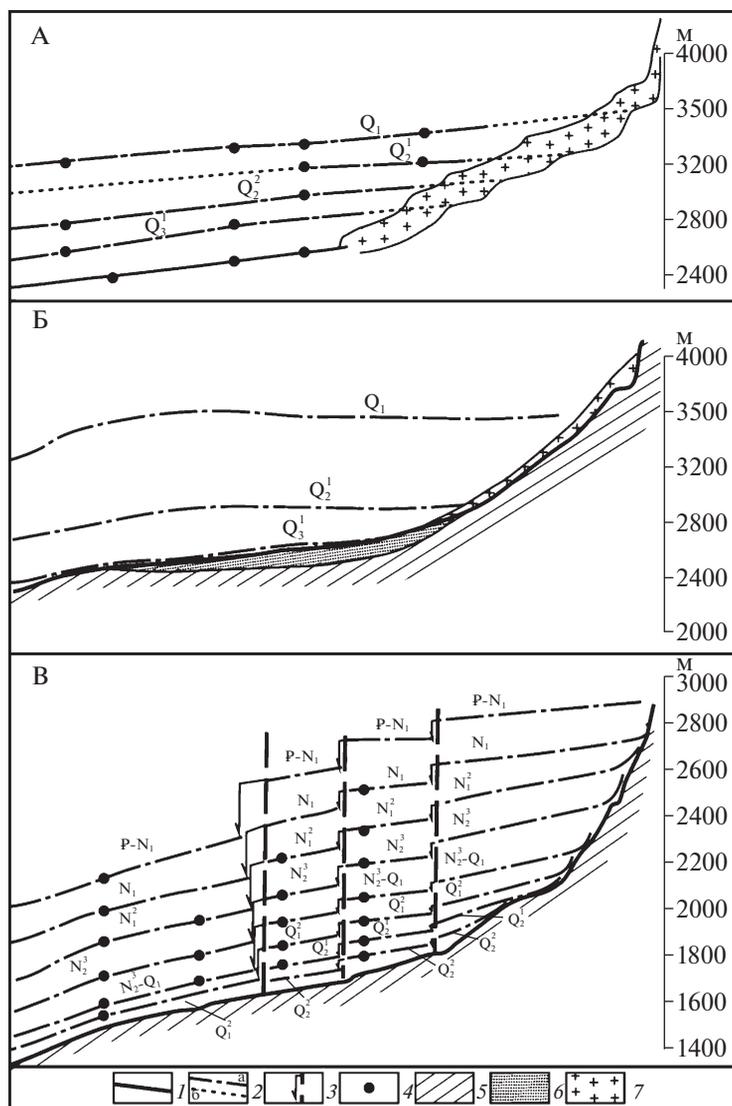


Рис. 5. Примеры тыловых террасовых лестниц: А – р. Зеравшан (по С.А. Несмеянову и И.И. Бархатову [16]), Б – р. Зеравшан (по О.К. Чедия [20]), В – р. Мзымта (по С.А. Несмеянову [13]). 1 – современное русло реки; 2 – террасовые уровни: а – достоверно установленные, б – предполагаемые; 3 – разрывные смещения террасовых уровней и их амплитуды, 4 – точки геодезических измерений; 5 – коренные породы; 6 – четвертичные аллювиальные отложения (Q_{3-4}); 7 – Зеравшанский ледник.

ющую возвышенность. В большинстве горных стран крупные хребты формировались, начинаясь с небольшой возвышенности, постепенно разрастаются вширь. При этом основные водотоки появляются уже на месте первичной возвышенности и последовательно осваивают ее поэтапно возникающие в рельефе краевые части или параллельные гряды своими трассами, которые ранее располагались на равнине, окружавшей первичную (осевую) гряду.

Однако, по мнению автора, прав был Ю. А. Скворцов, и на самом деле в подавляющем большинстве горных долин типичной является тыловая террасовая лестница – третий вариант (см. рис. 4В). Она зафиксирована детальной корреля-

цией террасовых и троговых уровней в различных горных странах. В качестве примеров (рис. 5) можно привести схемы террасовых рядов р. Зеравшан в Средней Азии [16, 20] и р. Мзымта на Кавказе [13].

Отмеченную ситуацию “переползания” современных крупных долинных ледников с одного тылового террасового уровня на другие, более молодые отмечали многие исследователи, что и послужило основанием для включения ее в учебные пособия по геоморфологии [23, с. 421]. Но обычно эти подледные уровни не коррелировались с террасовыми.

Проведенная корреляция террасовых уровней показала следующее. Во-первых, верховья речной долины, например, Зеравшана, где современный ледник “переползает” с более высоких террасовых уровней на все более низкие, отвечают законсервированной части долины. Во-вторых, конечные морены, флювиогляциальные и аллювиальные отложения каждого стратиграфического элемента залегают на едином эрозионном цоколе. В-третьих, из-под ледника в настоящее время вырывается мощный водный поток, со страшным грохотом ворочающий валуны. Соответственно, этот поток обладает весьма значительной эрозионной способностью. Поэтому при каждом благоприятном случае, связанном, например, с орогеническим импульсом, который увеличит уклон русла, подобный водоток сможет сформировать новый эрозионный врез. В-четвертых, по расположению и величине останцов разновозрастных террасовых уровней на разных бортах долины хорошо фиксируется различие поперечных тектонических перекосов, когда русло последовательно смещается то к одному борту долины, то к другому.

В охваченные оледенением верховья рек регрессивная эрозия проникала в самом конце эрозионной фазы, а эрозия последующего цикла обычно не достигала пределов эрозии предшествующего цикла, и таким образом в тыловой части горных долин формировалась повсеместно наблюдаемая ледниковая лестница. Соответственно многие ледники сначала продвигались по поверхности более древней террасы предшествующего эрозионно-аккумулятивного цикла. В этом случае ледниковой обработке подверглись только борта долины. Но в тех случаях, когда под ледником формировался мощный водоток, регрессивная эрозия могла предшествовать максимальному продвижению ледника. Тогда ледниковый язык, спускавшийся с одного террасового уровня на другой, оказывался в днище синхронного эрозионного вреза. В этом случае троговый облик приобретали не только борта, но и днище долины. Подобная ситуация подтверждается широко распространенным сопряжением днищ долинных трогов с цоколями аллювиальных террас [11, с. 123]. Следовательно, продвижение горных ледников могло продолжаться и в подфазу эрозионного расширения долин.

Естественно поэтому предположить, что в ледниковой фазе граница подфаз нарастания и распада горного оледенения близка к эпохе наиболее теплого и сухого климата, отвечающей времени накопления субстративного аллювия. Поэтому в разработанных частях горных долин разновозрастные морены, флювиогляциальные и аллювиальные отложения располагаются на единых цоколях, т.е. на соответствующих геоморфологических уровнях.

В законсервированных верховьях долин можно наблюдать соотношение молодого ледника с аллювием предшествующего эрозионно-аккумулятивного цикла. Так, на Восточном Кавказе в верховьях Кизику-Мухского Койсу описывается фациальное замещение перстративного аллювия флювиогляциальными отложениями и перекрытие флювиогляциальных отложений мореной, а в верховьях Сурхоба и других среднеазиатских рек – налегание на констративный аллювий флювиогляциальных галечников, которые, в свою очередь, перекрываются мореной долинного ледника [4, с. 99; 5, с. 53].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все вышеизложенное показывает, что исходные представления о простой двучленности эрозионно-аккумулятивного цикла в долинах горных рек нуждаются в учете многих осложняющих обстоятельств. По ряду направлений к настоящему времени достигнут определенный прогресс.

Детализация стадийности строения таких циклов позволила дифференцировать проявления тектонического и климатического факторов на разных стадиях активизации эрозии и аллювиальной аккумуляции.

Усложнилось представление о типизации террасовых уровней и вариантах геоморфологического строения верховьев горных долин.

Очевидно, выявленные разнообразные геоморфологические уровни в перспективе все полнее будут использоваться для геоморфологической корреляции и анализа этапности оргенеза. Кроме того, результаты детальной корреляции стадийности эрозионно-аккумулятивных циклов с тектоническими импульсами и климатическими изменениями, полученные в Средней Азии и на Кавказе, желательны сопоставить с подобными соотношениями в орогенах из иных климатических областей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Великанов М.А.* Структурные формы русловой турбулентности // Изв. АН СССР, сер. геофизич., 1951. № 3.
2. *Костенко Н.П.* О принципах составления специальной геоморфологической карты // Бюлл. МОИП. 1961. № 26. С. 20–34.
3. *Костенко Н.П.* Геоморфология. 2-е изд. М.: МГУ, 1999. 383 с.
4. *Макарова Н.В., Макаров В.И., Акинин Б.Е.* Основные закономерности строения четвертичного аллювия и стадии формирования террас горных рек Средней Азии // Бюлл. КИПЧ. 1979. № 49. С. 90–104.
5. *Макарова Н.В., Макаров В.И., Соловьева Л.И.* О переработке древнего рельефа горных стран четвер-

- тичным оледенением // Геоморфология. 1980. № 1. С. 48–54.
6. Макарова Н.В., Чистяков А.А., Акинин Б.Е. Закономерности формирования мощности аллювия горных рек // Бюлл. КИЧП. 2008. № 68. С. 70–81.
 7. Макарова Н.В., Макаров В.И., Постоленко Г.А., Акинин Б.Е. Представительность аллювия для стратиграфии и корреляции четвертичных отложений // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2011. Т. 19. № 4. С. 1–23.
 8. Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: МГУ, 1971. 115 с.
 9. Мамедов Э.Д. О плювиальных палеоклиматах пустынь в плейстоцене // Проблемы освоения пустынь. 1985. № 3. С. 10–16.
 10. Несмеянов С.А. К вопросу о стратиграфических схемах четвертичных отложений Западного Тянь-Шаня (в связи с существующими представлениями о развитии эрозионных циклов) // Бюлл. КИЧП. 1965. № 30. С. 136–144.
 11. Несмеянов С.А. Корреляция континентальных толщ. М.: Недра, 1977. 144 с.
 12. Несмеянов С.А. Методика изучения террасового генетического комплекса для анализа палеоэкологии палеолитических стоянок в горных областях // Методические проблемы реконструкций в археологии и палеоэкологии. Новосибирск: Наука, 1989. С. 225–260.
 13. Несмеянов С.А. Геоморфологические аспекты палеоэкологии горного палеолита (на примере Западного Кавказа). М.: Научный мир, 1999. 392 с.
 14. Несмеянов С.А. Генетические комплексы континентальных отложений. М.: Книга и Бизнес, 2012. 397 с.
 15. Несмеянов С.А. Оротектонический метод. М.: ООО “Миттель Пресс”, 2017. 376 с.
 16. Несмеянов С.А., Бархатов И.И. Новейшие и сейсмогенерирующие структуры Западного Гиссаро-Алая. М.: Наука, 1978. 120 с.
 17. Несмеянов С.А., Воейкова О.А., Мурый А.А. Методика построения среднемасштабных количественных палеореконструкций рельефа приморского орогена // Геоэкология. 2016. № 1. С. 3–24.
 18. Скворцов Ю.А. Метод геоморфологического анализа и картирования // Известия АН СССР. Сер. Геогр. и геофиз. 1941. № 4–5. С. 501–522.
 19. Чедия О.К. Юг Средней Азии в новейшую эпоху горообразования. Кн. 1. Континентальные кайнозойские накопления и геоморфология. Фрунзе: Илим, 1971. 332 с.
 20. Чедия О.К. Юг Средней Азии в новейшую эпоху горообразования. Кн. 2. Новейшая тектоника и палеогеография. Фрунзе: Илим, 1972. 226 с.
 21. Шульц С.С. К вопросу о генезисе и морфологии речных террас // Тр. КИЧП. 1934. Т. 3. Вып. 2. С. 65–80.
 22. Шульц С.С. Опыт генетической классификации речных террас // Изв. ВГО. 1940. Т. 72. Вып. 6. С. 739–750.
 23. Шукин И.С. Общая геоморфология. Т. 1. М.: МГУ, 1960. 616 с.
 24. Экспериментальная геоморфология. Вып. 2. М.: МГУ, 1969. 180 с.

FORMATION OF NEOPLEISTOCENE EROSIONAL ACCUMULATIVE CYCLES OF MOUNTAIN RIVERS

S. A. Nesmeyanov^{a, #}

^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#] *E-mail: voa49@mail.ru*

The concept about the structure of erosional and accumulative cycles in mountain-river terrace formation are getting gradually more complex as new data are being accumulated and original ideas appear. At first, four successive stages were distinguished in alluvium accumulation, i.e., the instrative, substrative, constrative, and perstrative stages. Later, it was realized that the boundary between the erosive and accumulative phases of the cycle lies within the substrative stage, whereas the boundary between the cycles of different age is found within the perstrative stage. The erosion phase is divided into subphases of deepening and lateral erosion. The deepening erosion subphase includes the end of the perstrative and the beginning of the instrative stages. The lateral erosion subphase, which controls the valley floor width, belongs to the substratum stage. A narrow instrative cutting deepens the substative valley bottom. The bulk of the alluvium is formed at the constrative stage. The erosion cutting depth depends on the orogenic force, whereas the cutting width is controlled by the climate-dependent water capacity. Deepening erosion predominates upon cooling and mountain glaciation, and the substrate stage coincides with the maximal climate warming. The progressive orogenesis forms a rear terrace sequence (a staircase) in mountain valleys. The age of its steps stands for the time of deepening erosion end and conservation of this valley section. Valley glaciers crawl from step to step, with their frontal moraines being facially replaced by fluvio-glacial and alluvial deposits of the same age.

Keywords: *terrace, erosional and accumulative cycle, erosional and accumulative phases, subphases of deepening and lateral erosion, instrative, substrative, constrative, perstrative stages of alluvium formation, rear terrace staircase*

REFERENCES

1. Velikanov, M.A. *Strukturnye formy ruslovoi turbulentnosti* [Structural forms of channel turbulence]. *Izvestiya AN SSSR, ser. geofizich.*, 1951, no. 3. (in Russian)
2. Kostenko, N.P. *O printsipakh sostavleniya spetsal'noi geomorfologicheskoi karty* [On the principles of compiling a special geomorphological map]. *Byulleten' MOIP*, 1961, no. 26, pp. 20–34. (in Russian)
3. Kostenko, N.P. *Geomorfologiya* [Geomorphology], 2nd edition, Moscow, MSU Publ., 1999, 383 p. (in Russian)
4. Makarova, N.V., Makarov, V.I., Akinin, B.E. *Osnovnye zakonomernosti stroeniya chetvertichnogo allyuviya i stadii formirovaniya terras gornyykh rek Srednei Azii* [Basic regularities of the Quaternary alluvium structure and the formation stages of mountain river terraces in Central Asia]. *Byulleten' KICHP*, 1979, no. 49, pp. 90–104. (in Russian)
5. Makarova, N.V., Makarov, V.I., Solov'eva, L.I. *O pere-raboitke drevnego rel'efa gornyykh stran chetvertichnym oledeneniem* [About the processing of the ancient relief in mountain areas by Quaternary glaciation]. *Geomorfologiya*, 1980, no. 1, pp. 48–54. (in Russian)
6. Makarova, N.V., Chistyakov, A.A., Akinin, B.E. *Zakonomernosti formirovaniya moshchnosti allyuviya gornyykh rek* [Regularities in the alluvium thickness formation in mountain rivers]. *Byulleten' KICHP*, 2008, no. 68, pp. 70–81. (in Russian)
7. Makarova, N.V., Makarov, V.I., Postolenko, G.A., Akinin, B.E. *Predstavitel'nost' allyuviya dlya stratigrafii i korrelyatsii chetvertichnykh otlozhenii* [Representativeness of alluvium for stratigraphy and correlation of Quaternary deposits]. *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya*, 2011, vol. 19, no. 4, pp. 1–23. (in Russian)
8. Makkaveev, N.I. *Stok i ruslovye protsessy* [Runoff and channel processes]. Moscow, MSU Publ., 1971, 115 p. (in Russian)
9. Mamedov, E.D. *O plyuvial'nykh paleoklimatakh pustyn' v pleistocene* [On pluvial paleoclimates of deserts in the Pleistocene] *Problemy osvoeniya pustyn'*, 1985, no. 3, pp. 10–16. (in Russian)
10. Nesmeyanov, S.A. *K voprosu o stratigraficheskikh skhemakh chetvertichnykh otlozhenii Zapadnogo Tyan'-Shanya (v svyazi s sushhestvuyushhimi predstavleniyami o razvitiy erozionnykh tsiklov)* [On the question of stratigraphic schemes of Quaternary deposits of the Western Tien Shan (in connection with existing ideas about the development of erosion cycles)]. *Byull. KICHP*, 1965, no 30, pp. 136–144. (in Russian)
11. Nesmeyanov, S.A. *Korrelyatsiya kontinental'nykh tolshch* [Correlation of continental strata]. Moscow, Nedra Publ., 1977, 144 p. (in Russian)
12. Nesmeyanov, S.A. *Metodika izucheniya terrasovogo geneticheskogo kompleksa dlya analiza paleoekologii paleoliticheskikh stoyanok v gornyykh oblastyakh* [Methods of studying the terrace genetic complex for the analysis of paleoecology of Paleolithic sites in mountain areas]. *Metodicheskie problemy rekonstruktsii v arkheologii i paleoekologii* [Methodical problems of reconstruction in archeology and paleoclimatology]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989, pp. 225–260. (in Russian)
13. Nesmeyanov, S.A. *Geomorfologicheskie aspekty paleoekologii gornogo paleolita (na primere Zapadnogo Kavkaza)* [Geomorphological aspects of Paleolithic paleoecology in mountain regions (by the example of the Western Caucasus)]. Moscow, Nauchnyi mir, 1999, 392 p. (in Russian)
14. Nesmeyanov, S.A. *Geneticheskie komplekсы kontinental'nykh otlozhenii* [Genetic complexes of continental deposits]. Moscow, Kniga i biznes Publ., 2012, 397 p. (in Russian)
15. Nesmeyanov, S.A. *Orotektonicheskii metod* [Orotectonic method]. Moscow, Mittel Press, 2017, 376 p. (in Russian)
16. Nesmeyanov, S.A., Barkhatov, I.I. *Noveishie i seismogeneriruyushchie struktury Zapadnogo Gissaro-Alaya* [The newest and seismogenerating structures of the Western Gissar-Alai]. Moscow, Nauka Publ., 1978, 120 p. (in Russian)
17. Nesmeyanov, S.A., Voeikova, O.A., Muryi, A.A. *Metodika postroeniya srednemasshtabnykh kolichestvennykh paleorekonstruktsii rel'efa primorskogo orogena* [Methodology for constructing medium-scale quantitative paleoreconstructions of the Primorsky orogen relief]. *Geoekologiya*, 2016, no. 1, pp. 3–24. (in Russian)
18. Skvortsov, Yu.A. *Metod geomorfologicheskogo analiza i kartirovaniya* [Method of geomorphological analysis and mapping]. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Geogr. i geofiz.*, no. 4–5, 1941, pp. 501–522. (in Russian)
19. Chediya, O.K. *Yug Srednei Azii v noveishuyu epokhu go-roobrazovaniya. Kn. 1. Kontinental'nye kainozoiskie nakopleniya i geomorfologiya* [The South of Central Asia in the modern era of mountain formation. Book 1. Continental Cenozoic accumulations and geomorphology]. Frunze, Ilim Publ., 1971, 332 p. (in Russian)
20. Chediya, O.K. *Yug Srednei Azii v noveishuyu epokhu go-roobrazovaniya. Kn. 2. Noveishaya tektonika i paleogeografiya* [The South of Central Asia in the modern era of mountain formation. Book 2. Recent tectonics and paleogeography]. Frunze, Ilim Publ., 1972, 226 p. (in Russian)
21. Shul'ts, S.S. *K voprosu o genezise i morfologii rechnykh terras* [On the question of the genesis and morphology of river terraces]. *Tr. KICHP*, 1934, vol. 3, is. 2, pp. 65–80. (in Russian)
22. Shul'ts, S.S. *Opyt geneticheskoi klassifikatsii rechnykh terras* [Experience in genetic classification of river terraces]. *Izv. VGO*, 1940, vol. 72, is. 6, pp. 739–750. (in Russian)
23. Shchukin, I.S. *Obshchaya geomorfologiya*. [General geomorphology]. Vol. 1. Moscow, MSU Publ., 1960, 616 p. (in Russian)
24. *Eksperimental'naya geomorfologiya* [Experimental geomorphology]. Vol. 2. Moscow, MSU Publ., 1969, 180 p. (in Russian)

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ

УДК 551.3;624.13

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ
ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР – ОПОЛЗНЕВЫХ
БЛОКОВ

© 2021 г. Г. П. Постоев^{1,*}, А. И. Казеев¹, М. М. Кучуков¹

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер., д. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: opolzen@geoenv.ru

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

После доработки 17.04.2021 г.

Принята к публикации 20.04.2021 г.

В геологической среде в поле тяготения Земли в каждой точке грунтового массива возникает, в соответствии с законами Паскаля и Кулона–Мора, распорное давление, которое зависит от веса залегающих выше пластов и прочности грунта в точке. Локальное силовое воздействие на оползнеопасный массив в виде экзогенных геологических процессов (оползни, эрозия, абразия и т.д.) вызывает интенсивный процесс разгрузки напряжений в прилегающем к склону коренном массиве и образовании диссипативных геологических структур (ДГС). Особенности геологического строения коренного массива не влияют на проявление ДГС, их функционирование до предельного состояния и процессы отделения и смещения в виде оползневого блока. Геологические закономерности проявляются в: образовании новых геологических границ-оболочек ДГС, пересекающих существующие структуры и тектонические нарушения (как и трещины от землетрясений); создании подпора подземных вод в коренном массиве перед ДГС; формировании характерных валов сжатия (складок), грабенов; характерном изменении напряженно-деформированного состояния и свойств грунтов по оболочке, на различных этапах преобразования ДГС в оползневой блок.

Ключевые слова: геологические закономерности, диссипативные геологические структуры, экзогенные процессы, базис оползания, предельное состояние, оползневой блок, геологические образования и постройки

DOI: 10.31857/S0869780921040081

ВВЕДЕНИЕ

В геологической науке оползни относятся к экзогенным геологическим процессам. При этом полагается, что основные причины развития оползневых смещений и их механизм тесно связаны с геологической историей формирования склона, включая исходные геологические структуры и тектонические границы, литологическое строение и свойства грунтов слоистой толщи, гидрогеологические условия. С другой стороны, известны многочисленные случаи деформаций и разрушения откосов техногенных земляных сооружений (насыпей, выемок, бортов карьеров), которые нередко трактуются как нарушения устойчивости сооружения по законам механики. Несомненно, геологические условия и строение грунтового массива, исходный рельеф, свойства грунтов, воздействие абразионных и эрозионных процессов должны изучаться и оцениваться при исследовании оползневого участка. Однако известно также, что геологическая история территорий творится и в современный период. Так, при землетрясениях вокруг эпицентра, временами на

значительном удалении от него, образуется трещина на земной поверхности, которая на большом протяжении сохраняет относительно линейное очертание. При этом она свидетельствует о глубинном развитии деформаций и рассекает как элементы рельефа, так и геологические структуры, не согласуясь с исходными тектоническими и другими границами в массиве [1].

Цель данной статьи – показать, что формирование оползневого блока как на этапах его подготовки, так и его смещения, приводит к образованию диссипативных геологических структур (ДГС) и соответствующих новых границ в массиве с проявлением геологических закономерностей их функционирования на локальном участке развития глубокого блокового оползня.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ИСХОДНАЯ
ОБСТАНОВКА НА ОПОЛЗНЕОПАСНОМ
УЧАСТКЕ

Для примера рассмотрим состояние грунтового массива на оползневом участке, на котором в

результате инженерно-геологических изысканий на определены геологические условия, включая установленные геологические структуры и тектонические границы, литологическое строение и свойства грунтов слоистой толщи, гидрогеологические условия. Грунтовый массив находится в условиях компрессионного сжатия, в соответствии с основами механики грунтов и законом прочности Кулона—Мора [5]:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_{str}} = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2), \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 — соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения; σ_{str} — структурная прочность грунта, φ — угол внутреннего трения грунта.

Структурная прочность σ_{str} определяется как предельное давление при испытании образца грунта на одноосное сжатие, характеризует прочность структурных связей грунта (прочность грунта как материала); аналитически $\sigma_{str} = 2c \operatorname{tg}(45 + \varphi/2)$, где c — сцепление грунта.

От давления $\sigma_{1i} = \gamma Z_i$ в каждой точке массива (элементарном объеме грунта) на глубине Z_i возникает распорное давление p_i , в соответствии с (1):

$$p_i = \sigma_{3i} = (\sigma_{1i} - \sigma_{str}) \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2). \quad (2)$$

Таким образом, в исходных геологических условиях в грунтовом массиве формируется статичное напряженно-деформированное состояние (НДС) с действием распорного давления по (2) в каждой i -й его точке.

Диссипативные геологические структуры

В работах [4, 5] было показано, что в геологической среде, как и в других средах (воздушной и водной) на участках локального силового возмущения (изменения исходного НДС) возникает процесс диссипации внешнего воздействия с образованием соответствующих новых диссипативных структур [7]. В геологической среде это диссипативные геологические образования — структуры ДГС, в виде отдельных замкнутых грунтовых массивов с геологическими границами с НДС отличным от исходного. Функционирование ДГС определяет закономерности формирования предельного состояния в оползнеопасном коренном массиве и проявления разрушительных деформаций при отделении и смещении ДГС в виде нового оползневого блока.

Уравнение предельного состояния коренного массива надоползневого уступа выводится из рассмотрения взаимодействия ДГС в коренных грунтах и в оползневом граничном блоке — смещенной ДГС, прилегающей к коренному массиву:

$$\gamma Z_a - \sigma_{str,a} = \pi \gamma (Z_a - H_{cr})/2, \quad (3)$$

где Z_a — глубина до базиса оползания блока в коренном залегании; γ — среднее значение удельного веса грунта в толще до глубины Z_a ; $\sigma_{str,a}$ — структурная прочность грунта в ДГС на глубине Z_a ; H_{cr} — критическое значение высоты откоса ДГС [4].

Закономерности образования диссипативных структур проявляются, в частности, в очертании их границ в виде сводов, вогнутая поверхность (сферическая, цилиндрическая) которых ориентирована в сторону снижения распорного давления в ДГС; при изменении ее состояния к критическому уровню (когда величина оседания блока достигнет H_{cr}); в наличии внутренних границ, обуславливающих взаимосвязи ДГС между собой. Концентрация напряжений от внутреннего распорного давления в грунтах в граничном своде ДГС позволяет ограничить влияние оползневого очага в пределах надоползневого уступа, без захвата остальной части коренного массива.

В соответствии с уравнением (3), при формировании предельного состояния ДГС-блока максимальные значения напряжений создаются на уровне максимальной глубины Z_a возникшей ДГС (см. рис. 1, базис Б) с учетом прочности грунтов в этой зоне.

Вместе с тем, образование диссипативных крупных структур в геологической среде, в частности в оползнеопасном массиве, — это геологический процесс изменения исходного состояния, геологических условий и строения грунтовых массивов в ограниченной области геологической среды при возникновении внешнего силового возмущения, например, оползневого очага.

Геологические закономерности проявляются в: преобразовании структурных изменений исходного поля распорных давлений в ДГС с материальными границами (оболочками) [4, 5], формировании базиса ДГС, в создании новых условий функционирования ДГС как оползневых блоков, особенностях деформирования грунтов ДГС с образованием валов сжатия, складок, грабенов и др.

ОБРАЗОВАНИЕ БАЗИСА ИЗМЕНЕНИЯ НДС МАССИВА И ПОДГОТОВКА БЛОКА ОПОЛЗАНИЯ ДГС КАК ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Подготовка оползневого блока в коренном массиве происходит как геологический процесс изменения исходного НДС и геологического строения массива. Нижняя граница образования ДГС в коренном массиве определяется по базису геологического процесса, осуществляющего силовое возмущение и обуславливающего изменение НДС на ограниченном участке склона (см. рис. 1) [4, 5].

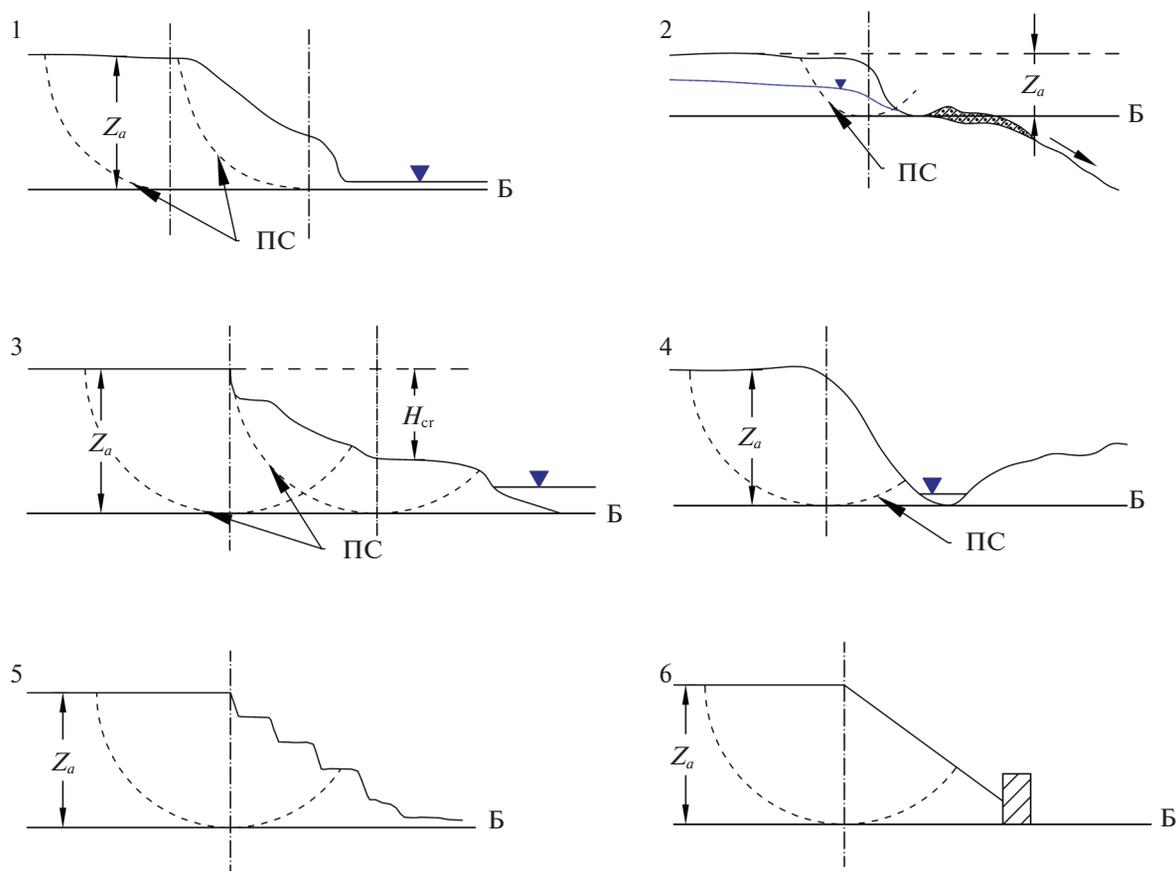


Рис. 1. Схемы воздействия геологических процессов на формирование диссипативных геологических структур (ДГС). Образование базиса ДГС (линия Б) при: 1 – боковой эрозии склона (абразия) водоема; 2 – возникновении эрозионного очага в средней части склона; 3 – смещении блоков на оползневом участке (горизонтальная поверхность скольжения); 4 – развитии талика от водного потока в массиве ММП; 5 – разработке борта карьера или откоса отвалов; 6 – подвижке подпорной стенки. ПС – поверхность скольжения.

1. Указанная граница может сформироваться под действием боковой эрозии (абразии) с образованием клифа и возникновением прогрессирующей разгрузки напряжений в грунтах на уровне базиса эрозии (см. рис. 1.1).

2. В качестве причины образования базиса ДГС может быть возникновение эрозионного очага в месте разгрузки подземных вод на склоне (проявление “висячих” блоковых оползней) (см. рис. 1.2).

3. Нижняя граница новых ДГС – базис ранее смещенного оползневой блока (критический уровень оползневой террасы) на участках развития глубоких оползней с поверхностью скольжения (ПС) оползневой тела (см. рис. 1.3).

4. На высоких склонах, сложенных многолетнемерзлыми породами (ММП), нижняя граница ДГС может сформироваться при горизонтальном развитии талика от водных потоков (базис оттаивания грунтов), протекающих у подножья склона (см. рис. 1.4).

5. Для крупных блоковых оползней на бортах карьеров и откосах отвалов в качестве нижней границы ДГС выступает горизонт разработки продуктового слоя (нижний уровень борта) или критического состояния деформируемого горизонта отвала (см. рис. 1.5).

6. На откосе, где для обеспечения его устойчивости сооружена подпорная стенка, нижняя граница ДГС может определяться по подошве податливой (сдвинутой) стенки или, если имеется слабое основание, ниже его базиса (см. рис. 1.6).

По пунктам 1–4 причинами образования в коренном массиве являются геологические процессы, а по п.п. 5–6 – их техногенные аналоги. То есть образование базиса не столько связано с положением возможного слабого слоя в исследуемом оползнеопасном массиве, сколько с горизонтом внешнего воздействия на массив в виде экзогенного процесса или техногенной подработки склона.

Нижняя граница и основной параметр ДГС

Результаты исследований показывают, что формирование диссипативных структур в первую очередь связано с локальным изменением напряжений, т.е. с реакцией поля напряжений на ограниченное силовое возмущение. Локальное снижение напряжений вызывает диссипацию и перестройку поля напряжений в эпицентре силового возмущения в виде сферических (цилиндрических) сводов. В геологической среде такие своды на этапе подготовки ДГС представляются виртуальными, но, например, в атмосфере над зоной пониженного давления диссипативная граница-свод проявляется в виде радуги.

При образовании склона (откоса) снижается вертикальное давление от веса грунтов на горизонты массива, залегающие ниже. То есть склон создает аномалию пониженных значений вертикального и соответственно распорного давления на массив, расположенный ниже его основания. В результате длительного природного процесса формирования склона происходит медленная постепенная адаптация напряженного состояния грунтового массива. Локальное силовое возмущение, например, в виде активной боковой эрозии (абразии) с размывом грунтов нижней части склона и постройкой высокого крутого откоса клифа, создает новое качество в функционировании склона. **Образуется нижняя граница (базис Б) интенсивного преобразования склона, отделяющая верхний массив с динамично изменяющимся НДС от нижнего, где нет влияния склоновых процессов на исходное состояние массива.**

Диссипативные структуры проявляются с граничными поверхностями в виде “опрокинутых сводов” (полуцилиндров), расположенных своими вершинами (образующими полуцилиндра) на базисе Б, и основанием (диаметральной горизонтальной плоскостью) — на уровне дневной поверхности коренного массива. Таким образом, поверхность отрыва оползневого ДГС-блока (см. рис. 1) выглядит как дуга длиной $\pi r/2$ (где $r = Z_a$ — расстояние между верхней и нижней границами ДГС и соответственно радиус окружности — контура ДГС в вертикальном сечении по центральному створу оползнеопасного участка).

Таким образом, Z_a является основным параметром ДГС, так как определяет нижнюю границу и фронт диссипации (по глубине) со стороны склоновых процессов. Местоположение ДГС, в соответствии со сказанным выше, достаточно четко может быть определено на оползнеопасном участке, если проявилась трещина закола (на начальном этапе образования стенки срыва) в краевой части плато (на верхней площадке склона, откоса).

Зона отрыва оползневого блока

Подготовка оползневого блока проявляется как формирование геологических границ образующей в массиве новой крупной структуры. В геологической среде начинают оформляться новые несущие элементы вблизи силового возмущения для восприятия энергии его воздействия в ограниченном объеме массива без участия остальной части геосреды. В качестве несущего элемента ДГС выступает его граничная оболочка, возникающие напряжения в которой на два порядка превышают исходные значения распорного давления в точках массива [5]. При этом формируется замкнутое НДС внутри ДГС; связь в напряжениях с окружающей геологической средой (за пределами ДГС) отсутствует.

В соответствии с уравнением предельного равновесия ДГС, **критическое состояние структуры определяется напряжениями и прочностью грунтов на горизонте ее базиса.** Причем предельное состояние достигается по вертикальному сечению центрального створа оползнеопасного массива и распространяется по всей оболочке ДГС. Зона отрыва оползневого блока — это тыловая часть оболочки ДГС. В момент нарушения равновесия по уравнению (3) на горизонте базиса ДГС по оболочке происходит разрыв сплошности (структурных связей, $\sigma_{siri} = 0$) с грунтом внутри ДГС. Причем этот процесс одномоментно захватывает граничные поверхности ДГС на протяжении всего формируемого оползневого блока. **Вогнутая сторона дуги зоны отрыва указывает, что источник силового возмущения находится ниже по склону, в виде базиса разгрузки напряжений различного генезиса (см. рис. 1).**

**ПРИМЕРЫ ПРОЯВЛЕНИЙ
ДИССИПАТИВНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
СТРУКТУР И ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ
НОВЫХ ОПОЛЗНЕВЫХ ДГС-БЛОКОВ**

Активизация оползневого процесса и подготовка нового оползневого блока на участке Хорошево (г. Москва) началась в конце 2006 г. В декабре проявилась трещина закола, в январе 2007 г. началось оседание оползневого блока со смещением грунтового массива ДГС по своей “оболочке”, как по поверхности скольжения (рис. 2).

Высота откоса надоползневого уступа на момент начала отделения нового оползневого блока имела критическое значение H_{cr} (см. рис. 2). Это было установлено по результатам анализа положения оползневой террасы и вычислительных процедур по оценке состояния надоползневого уступа по уравнению предельного состояния (3), в сопоставлении с данными мониторинга.

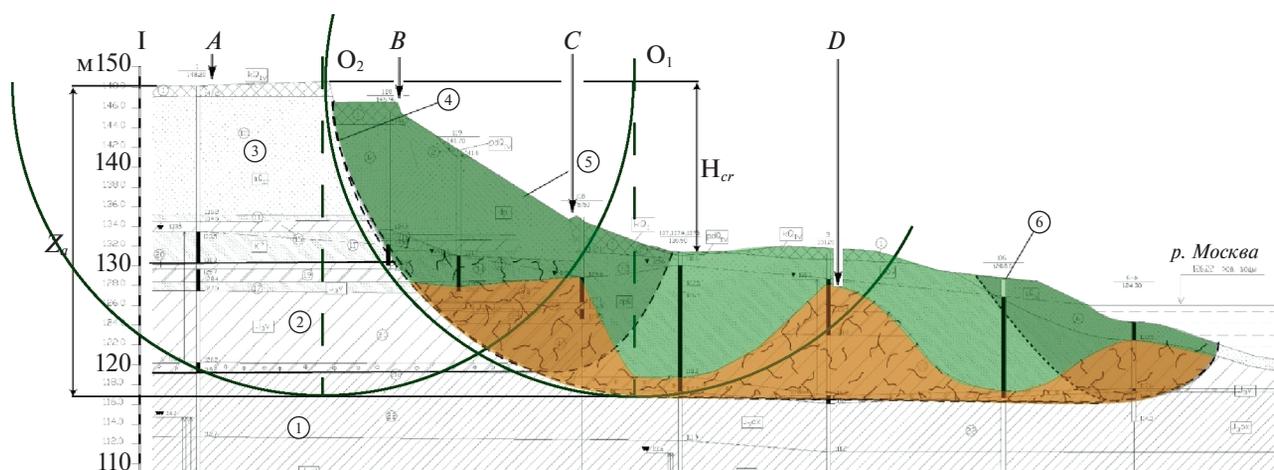


Рис. 2. Схематический инженерно-геологический разрез по центральному створу (I – I) очага смещения нового оползневой блока на оползневом участке Хорошево (Москва). 1 и 2 – соответственно глины волжского и оксфордского ярусов юрской системы; 3 – пески четвертичных отложений; 4 – поверхность скольжения; 5 – тело оползня; 6 – скважина. Границы ДГС-блоков показаны, как дуги окружности радиусом Z_a , зелеными линиями. A, B, C, D – индикаторы проявления ДГС.



Рис. 3. Фото поднятой трещины сжатия у подножья откоса нового блока на участке Хорошево (Москва).

Возникновение трещины закола (см. рис. 2, точка O_2) – выход на поверхность новой геологической границы (оболочки) нового оползневой ДГС-блока.

Положение в коренном массиве надоползневой уступа базиса ДГС определено расчетом по уравнению предельного равновесия (3), анализировалось НДС на горизонте базиса ДГС в коренном залегании и в оползневом массиве. На основе расчетов было показано, что ДГС с центром O_2 (см. рис. 2) достигнет предельного состояния, когда оползневой ДГС-блок с центром O_1 осядет до уровня оползневой террасы, т.е. на H_{cr} .

В результате инженерно-геологических изысканий и натурных наблюдений получены данные для расчета глубины поверхности скольжения:



Рис. 4. Фото поднятой трещины сжатия в верхней части катастрофического оползня на откосе отвала в Кузбассе, 2015 г. (фото А.И. Казеева).

$c = 47.2 \text{ кН/м}^2$; $\varphi = 22^\circ$ (средние значения); $H_{cr} = 15.8\text{--}16.0 \text{ м}$; $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$ (среднее округленное значение для толщи грунтов в пределах глубины Z_a). Подставив эти значения в формулу (3), получили $Z_a = 31.2\text{--}31.5 \text{ м}$ (глубина базиса оползания – нижняя граница развития диссипации).

По данным инклинометрии установлено, что $Z_a = 31.0\text{--}31.2 \text{ м}$ (в глинах оксфордского яруса юрской системы). То есть расчетная глубина поверхности скольжения Z_a была подтверждена фактическими данными инклинометрических измерений в скважинах.

Следует иметь в виду, что на результаты расчетов величины Z_a по уравнению (3) существенно влияет точность определения структурной прочности грунтов на искомой глубине, установленной по данным инженерно-геологических изыс-

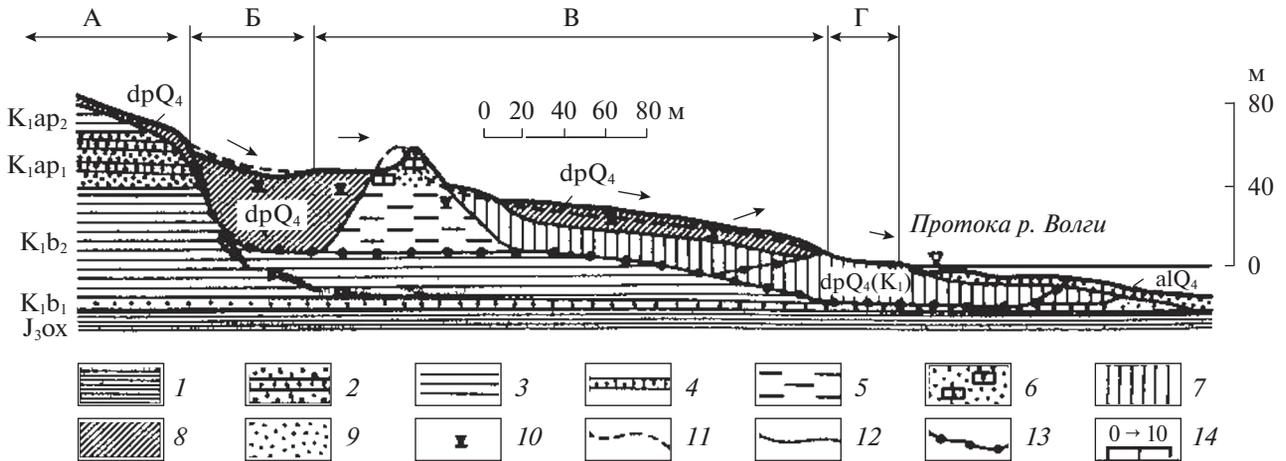


Рис. 5. Схематический геологический разрез по оси оползня на Соколовой горе в г. Саратов (1968 г.) [6]. А – приподвиженная полоса верхней части склона; Б – площадка просевшей поверхности земли в головной части оползня; В – основная часть массива оползня, надвинувшаяся на нижнюю оползневую ступень; Г – нижняя оползневая ступень. 1 – юрские (оксфордские) глины (J_{3ox}); 2 – барремские пески (K_{1b1}); 3 – барремские (K_{1b2}) и аптские (K_{1ap2}) глины; 4 – нижняя пачка апта: слабые песчаники и пески (K_{1ap1}); 5–7 – смещенный по горизонтали массив нижнемеловых пород: 5 – барремских глин, 6 – нижней пачки апта; 7 – смешанные блоки нижнемеловых глин; 8 – перемежные оползневые глины и суглинки; 9 – пески современного аллювия; 10 – уровень грунтовых вод; 11–12 – профиль склона: до (11) и после (12) подвижки оползня; 13 – подошва оползня (она же подошва массива, надвинувшегося на нижнюю оползневую ступень); 14 – векторы смещения при подвижке оползня и их масштаб.

каний. Поэтому в расчетах должен быть учтен разброс полученных экспериментальных данных, и на определенном этапе могут быть выявлены только расчетные границы положения базиса ДГС с возможным уточнением глубины Z_a в результате дальнейших исследований.

Образование поднятой трещины сжатия (рис. 3) есть проявление фронтальной границы клина – элемента двух ДГС с центрами O_1 и O_2 , основанием которого является линия O_1O_2 (на рис. 2, индикатор С), свидетельствующая что в формировании блока частично участвует и ДГС с центром O_2 .

Подобное развитие оползневого процесса имело место и при образовании блокового оползня на других участках, например, на откосе техногенного отвала (рис. 4).

Упомянутый выше “клин” может проявиться в виде провала, с превращением поднятой трещины сжатия и площадки “клина” в “грабен” (рис. 5). Вероятно, в этом случае по фронтальной оболочке ДГС с центром O_2 (см. рис. 2) при отделении нового оползневого блока также происходит разрушение структурных связей в грунтах и, соответственно, резкое снижение их сопротивления сдвигу вдоль этой границы, как поверхности скольжения.

В приведенном примере оползня в г. Саратов упомянутый выше клин просел на 20 м (зона Б на рис. 5, шириной по верху более 60 м).

Валы сжатия – складки (см. рис. 2, индикатор D) образуются вследствие нарушения равно-

весия сил на глубине базиса ДГС, раздавливания нижних горизонтов ДГС-блока и его смещении по цилиндрической поверхности скольжения с эффектом выдавливания грунтов на участке восходящей поверхности смещения блока. Такие геологические проявления часто выявляются при построении инженерно-геологических разрезов на склонах с развитием глубоких блоковых оползней (рис. 6).

Геологическая граница – поверхность отрыва ДГС обозначается и формируется по мере подготовки ДГС после проявления ее базиса. Грунтовый массив ДГС до момента нарушения предельного состояния находится в условиях допредельного деформирования (осадки) в границах “оболочки”. Процесс отделения блока начинается с нарушения равновесия на горизонте базиса, в соответствии с уравниванием (3), преодоления структурной прочности грунтов на этом горизонте и разрыва структурных связей вдоль всей оболочки ДГС. При этом исходная прочность грунтов и тектонические границы практически не оказывают влияния на образование разрыва сплошности по оболочке, как по центральному сечению (см. рис. 2, окружность с центром O_1), так и на всем протяжении ДГС-блока (в приведенном примере радиус кривизны блока около 180 м). При этом могут рассекаться и слои с прочными скальными грунтами, например, как это произошло на оползневом склоне в г. Одесса, где плоскость смещения блока рассекла прочные

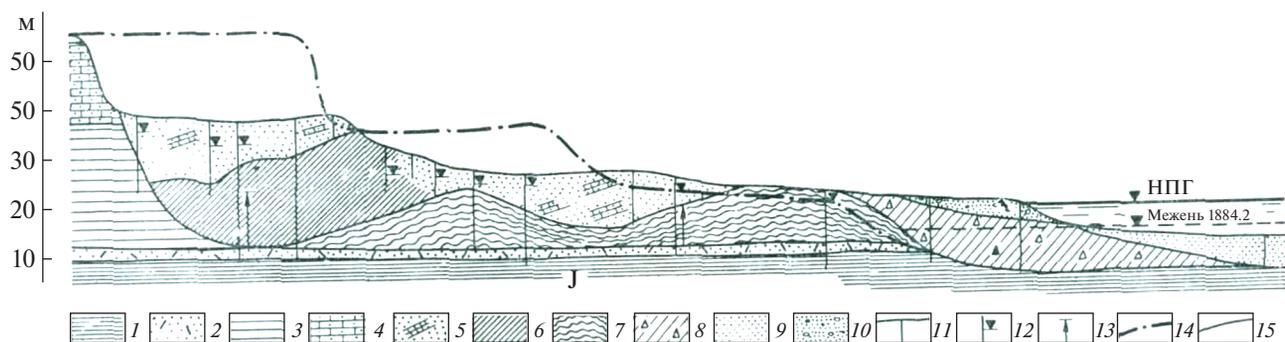


Рис. 6. Геологический разрез оползня Соколовой горы в г. Саратов [2]. Валу сжатия в смещенных блоках, выявленные при бурении оползневого склона. 1 – юрские глины; 2 – барремские глинистые пески; 3 – барремские несмещенные глины; 4 – нижнеаптские несмещенные песчаники; 5 – смещенные нижнеаптские песчаники; 6 – смещенные барремские глины; 7 – глинистые породы валов выдавливания (сжатия); 8 – нерасчлененные оползневые накопления; 9 – пески аллювиальные; 10 – пески с галькой (насыпной грунт); 11 – скважины; 12 – уровень воды водоносного горизонта со свободным зеркалом; 13 – уровень воды напорного горизонта; 14 – предполагаемый профиль склона до оползня; 15 – современный профиль склона.

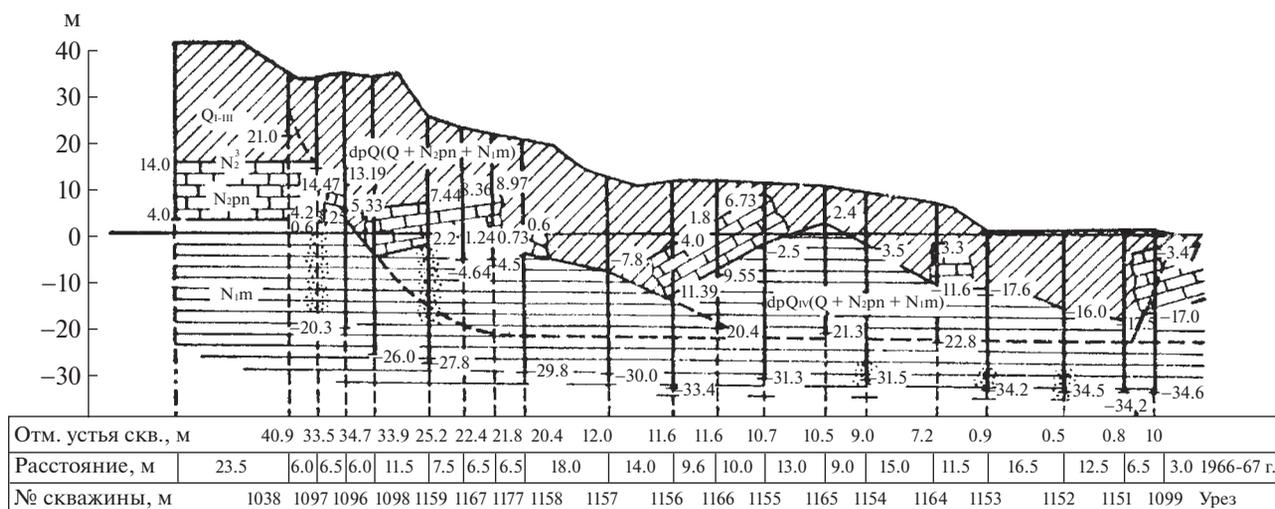


Рис. 7. Геологический разрез оползневого склона в XII амфитеатре в Одессе, по П.Н. Науменко [3]. 1 – лессовидные породы; 2 – глины; 3 – известняки; 4 – глины песчаные и прослойки песка. Поверхность склона и мезотиса в современном профиле: 5 – до катастрофической подвижки; 6 – после катастрофической подвижки; 7 – предполагаемая граница оползневых смещений. $dpQ_{IV}(Q + N_{2rp} + N_{1m})$ – современные оползневые отложения; Q_{I-III} – четвертичные отложения; N_2^3 – верхнеплиоценовые отложения; N_{2rp} – понтические отложения; N_{1m} – мэотические отложения.

понтические известняки мощностью около 10 м (рис. 7).

Следует отметить, что подобным образом проявляется геологическая граница после землетрясения, рассекая на большую глубину геологическую среду, не считаясь с рельефом, геологическим строением и тектоническими границами массивов на многие километры ее протяжения. Например, как при мощном землетрясении в Нефтегорске (27.05.1995 г., на севере о. Сахалин), где очаг землетрясения располагался вблизи поверхности и вышел на нее в виде системы разрывов общей протяженностью 40 км [1].

Приведенные примеры показывают, что образование диссипативных структур имеет геологические основы и является откликом геологической среды на локальное силовое возмущение, как в виде землетрясения (от его эпицентра), так и при подготовке оползневого блока.

Влияние прочности грунтов и гидрогеологических условий на формирование оползневых ДГС-блоков

Основное значение в создании условий для подготовки предельного состояния ДГС надоползневого уступа имеют свойства грунтов ($\gamma, c_a, \phi_a, \sigma_{str,a}$) на глубине Z_a – горизонте базиса ДГС. Эти свойства учитываются при оценке состояния

массива в соответствии с уравнением (3). Прочность грунтов внутри ДГС на разных ее глубинах проявляется в значениях распорного давления, определяемых по закону Кулона—Мора с учетом структурной прочности по уравнению (2). Нарушение предельного состояния на горизонте базиса ДГС (глубина Z_a) вызывает разрушение структурных связей между минеральными частицами, составляющими грунт, по всей оболочке ДГС (т.е. $\sigma_{stri} = 0$). Дальнейшее движение грунтового массива ДГС – нового оползневого блока, происходит по схеме сдвига по оболочке с разрывом сплошности грунтов, т.е. как по подготовленной поверхности сдвига (схема “плашка по плашке”).

На участке Хорошево, как указано выше, в уравнении (3) для оценки предельного состояния участвуют характеристики для глин оксфордского яруса юрской системы (глубина Z_a): $c = 47.2 \text{ кН/м}^2$; $\varphi = 22^\circ$. После отделения нового блока (см. рис. 2, ДГС с центром O_1) происходит его оседание по схеме сдвига с оказанием давления на оползневой массив, расположенный ниже по склону. Таким образом, в оценке предельного состояния ДГС на момент, предшествующий отделению нового оползневого блока, используются данные о прочности грунтов, залегающих в коренном массиве на глубинах искомого базиса. На участке Хорошево была возможность сопоставить результаты расчетов с данными тензометрических и инклинометрических измерений. Фактически расчеты значений Z_a могут производиться на основе данных инженерных изысканий с использованием значений инженерно-геологических элементов и, как указано выше, уточняться в процессе исследований и по мере получения новой информации об объекте.

До активизации оползневого процесса на участке Хорошево уровень грунтовых вод (УГВ) по центральному створу находился на отметках 131.5–132.0 м (по данным инженерно-геологических исследований в 2004–2005 гг.). С образованием ДГС, но возможно до проявления трещины закола, произошел подъем УГВ, который отразился в обводнении канализационных дренажных колодцев, расположенных на территории Храма Животворящей Троицы и поселка в краевой части плато участка, вплоть до самоизлива воды (по описанию очевидцев). По центральному створу участка активизации оползневого процесса УГВ за пределами границы ДГС поднялся до отметки 134.0 м (см. рис. 2, индикатор A), т.е. на 2 м. Внутри ДГС значение УГВ оставалось 131.6–132.0 м (индикатор B), т.е. приток грунтовых вод прервался. Возникновение трещины закола и соответственно оболочке ДГС не вызвало понижения УГВ на площадке плато. Оболочка ДГС – это, как указано выше, несущая конструкция новой структуры, в которой концентрируются на-

пряжения, на два порядка превышающие распорное давление в точке. Высокие значения напряжений в оболочке ДГС **блокируют движение подземных вод в сторону падения склона, создавая их подъем у границы ДГС (у центрального створа) и поворот потоков вдоль граничной поверхности ДГС к ее бортам (где нередко образуются эрозионные врезь).**

ВЫВОДЫ

Образование нового оползневого блока происходит как развитие диссипации в коренном массиве – защитной реакции геологической среды на локальное силовое возмущение различного генезиса. Диссипативные изменения напряженно-деформированного состояния в коренном массиве протекают как геологический процесс, в результате которого формируются диссипативные геологические структуры (ДГС), и на их основе происходит образование и смещение оползневого блока.

Рассмотрены следующие геологические закономерности, которые являются результатом функционирования ДГС:

- образование в массиве новых крупных структур – ДГС, с появлением базиса диссипации, граничных поверхностей (оболочек) и формированием в этом замкнутом пространстве НДС, отличного от НДС вмещающего массива;

- формирование граничных поверхностей, отделяющих ДГС от окружающего массива и связующих ДГС между собой, в том числе с оползевым ранее смещенным блоком;

- преобразование ДГС в оползневой блок по достижении предельных значений напряжений в оболочке ДГС на горизонте ее базиса в соответствии с уравнением предельного состояния (3), учитывающим величины вертикального давления в оболочке в коренной и смещенной частях ДГС и исходное значение структурной прочности грунтов на уровне ее базиса;

- подготовка и смещение оползневого ДГС-блока сопровождаются проявлением характерных геологических признаков оползневого процесса:

- отделение блока с образованием геометрически правильной граничной поверхности (в сечении по центральному створу – окружности), секущей грунтовую толщу от дневной поверхности до базиса ДГС;

- возникновение трещин (трещина закола, поднятая трещина сжатия) в результате выхода границ ДГС на дневную поверхность;

- образование в смещенном блоке характерных элементов в рельефе и разрезе: провалов (грабенов), валов сжатия; изменения исходных гидрогеологических условий в связи с образованием подпора с внешней границы ДГС.

Анализ геологических закономерностей преобразования возникающих в массиве ДГС в

оползневой блок позволяет установить границы ДГС, произвести оценку предельного состояния коренного массива, разработать модели развития оползневой массы, схемы мониторинга для предупреждения разрушительных деформаций и рекомендации по защитным мероприятиям.

Вместе с тем отметим, что необходимо продолжить дальнейшие исследования функционирования диссипативных геологических структур в геологической среде с целью выявления новых закономерностей их развития при подготовке разрушительных оползневых деформаций и разработки способов и средств их предотвращения или минимизации последствий.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР по теме № г.р. АААА-А19-119021190077-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коронковский Н.В. Общая геология. Учеб. М.: КДУ, 2006. 561 с.

2. Кюнцель В.В. Закономерности оползневой массы на Европейской территории СССР и его региональный прогноз. М.: Недра, 1980. 213 с.
3. Науменко П.Н. Условия формирования и инженерно-геологическая характеристика оползней Черноморского побережья Одессы // Оползни Черноморского побережья Украины. М.: Недра, 1977. С. 57–100.
4. Постоев Г.П. Диссипативные структуры в грунтовой массе на примере формирования глубоких оползней // Инженерная геология. 2018. Т. XIII. № 3. С. 54–61.
5. Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. 2020. № 6. С. 22–31.
6. Тихвинский И.О. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. М.: Наука, 1988. 144 с.
7. Nicolis, G., Prigogine, I. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations. New York: J. Wiley & Sons, 1977.

GEOLOGICAL REGULARITIES OF FORMATION OF DISSIPATIVE GEOLOGICAL STRUCTURES – LANDSLIDE BLOCKS

G. P. Postoev^{a, #}, A. I. Kazeev^a, and M. M. Kuchukov^a

^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#] *E-mail: opolzen@geoenv.ru*

Side-thrust stress (depending on the weight of the above-lying strata and the soil strength at the point), is formed in the geological environment (in the Earth's gravitational field) in each point of the soil mass according to the Pascal and Mohr–Coulomb laws. A local force impact on a landslide-prone mass by geological processes (landslides, erosion, abrasion, etc.) results in an intense stress discharge in the bedrock massif adjacent to the slope and in the formation of dissipative geological structures (DGS). The features of the geological structure of the bedrock massif has no effect on the DGS manifestation, as well as DGS functioning under the limit state and the processes of separation and displacement in the form of a landslide block. Geological features are manifested through: the formation of new geological boundaries (envelopes) of DGSs, which divide the existing structures and tectonic faults (like cracks produced by earthquakes); the barrage effect in ground water within the bedrock massif in front of DGS; the formation of specific compression folds and grabens; as well as the specific changes in stress-strain state and properties of soils along the envelope of future displacement surface at different transformation stages of DGS into a landslide block.

Keywords: *geological regularities, dissipative geological structures, geological processes, landslide basis, limit state, landslide block, geological structures*

REFERENCES

1. Koronovskii, N.V. *Obshchaya geologiya* [General geology]. Ucheb. Moscow, KDU Publ., 2006, 561 p. (in Russian)
2. Kyunttsel', V.V. *Zakonomernosti opolznevoogo protsessa na Evropeiskoi territorii SSSR i ego regional'nyi prognoz* [Regularities of the landslide process in the European territory of the USSR and its regional forecast]. Moscow, Nedra, 1980, 213 p. (in Russian)
3. Naumenko, P.N. *Usloviya formirovaniya i inzhenerno-geologicheskaya kharakteristika opolznei Chernomorskogo poberezh'ya Odessa* [Formation conditions and engineering geological characteristics of landslides at the Black Sea coast of Odessa]. *Opolzni Chernomorskogo poberezh'ya Ukrainy*. Moscow, Nedra, 1977, pp. 57–100. (in Russian)
4. Postoev, G.P. *Dissipativnye struktury v gruntovom masive na primere formirovaniya glubokikh opolznei* [Dissipative structures in soil massif by the example of deep landslides formation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, vol. XIII, no. 3, pp. 54–61. (in Russian)
5. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. *Fizicheskie zakony raspredeleniya davleniya v geologicheskoi srede* [Physical laws of pressure distribution in the geological environment], *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 22–31. (in Russian)
6. Tikhvinskii, I.O. *Otsenka i prognoz ustoichivosti opolznevyykh sklonov* [Assessment and forecast of the stability of landslide slopes]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 144 p. (in Russian)
7. Nicolis, G., Prigogine, I. *Self-organization in non-equilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations*. New York: J. Wiley & Sons, 1977.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 556.314.6(282.256.1)

ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ РЕЧНЫМИ И ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ В НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕКИ ТОМЬ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ)

© 2021 г. О. Н. Владимирова^{1,*}, О. Г. Савичев^{1,**}

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа природных ресурсов,
пр. Ленина, 30, Томск, 634050 Россия

*E-mail: onv-2018@yandex.ru

**E-mail: OSavichev@mail.ru

Поступила в редакцию 21.09.2020 г.

После доработки 19.01.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Выполнен анализ взаимосвязей между количеством и составом атмосферных, речных и подземных вод в водосборах шести малых притоков р. Томь в окрестностях г. Томск (Российская Федерация, Западная Сибирь, бассейн р. Обь) по данным многолетних гидрогеологических и гидрологических наблюдений (с 1970-х гг. до 2019 г.). Показано, что при снижении интенсивности водообмена увеличивается время взаимодействия в системе “вода–порода” и, соответственно, суммарное содержание в подземных водах растворенных солей. Впервые для участка нижнего течения Томи установлено, что степень взаимосвязанности речных, подземных грунтовых и артезианских вод может быть оценена с помощью коэффициента вариации $Cv(Y_m)$ месячных значений слоя стока малых рек – чем больше значение $Cv(Y_m)$, тем больше “закрытость” глубоких водоносных горизонтов и минерализация подземных вод. Установлено, что для территорий со значительным пополнением влагозапасов в теплый период года (в правобережной части водосбора Томи) преобладают процессы выщелачивания и растворения горных пород, а для территорий с преобладающим пополнением ресурсов подземных вод в период снеготаяния (в левобережной части бассейна Томи) более значительную роль играют процессы поступления веществ извне, включая атмосферные осадки.

Ключевые слова: водный баланс, геохимический баланс, речные и подземные воды, Алтае-Саянская гидрогеологическая складчатая область, Западно-Сибирский артезианский бассейн, притоки р. Томь, Томск

DOI: 10.31857/S0869780921040111

ВВЕДЕНИЕ

Проблема снабжения населения качественной питьевой водой чрезвычайно актуальна во многих регионах, в том числе и в г. Томск – административном центре Томской области (Российская Федерация, Сибирский федеральный округ). Соответственно, большое значение имеют исследования условий формирования ресурсов и состояния подземных вод, используемых для питьевых нужд. Водоснабжение Томска осуществляется из Томского подземного водозабора (в размере около 200 тыс. м³/сут) и ряда менее значительных водозаборов и отдельных скважин [15, 29].

В последние годы территория городской застройки расширяется, что определяет задачу обеспечения качества подземных вод, в том числе за счет организации и контроля состояния санитарных зон водозаборов и водоохраных зон рек,

водосборы которых полностью или частично совпадают с областями питания и разгрузки подземных вод. Важность этих вопросов определяется тем, что отбор подземных вод, гидравлически связанных с реками, потенциально может привести к уменьшению их стока и поступлению в подземные водоносные горизонты загрязняющих веществ с поверхности и зоны аэрации (поверхностный сток, утечки из систем водо- и теплообеспечения, канализации, автозаправочных комплексов и иных производственных объектов). Кроме того, при застройке территории изменяются условия формирования поверхностного и подземного стока, водное питание более глубоких горизонтов и, как следствие, ухудшение качества подземных вод [6, 27, 37].

С учетом этого в Томском политехническом университете (ТПУ) совместно со специалистами ряда научных и производственных организаций



Условные обозначения

▲ Пункты гидрологических наблюдений

— Реки

- - - Границы субъектов в РФ

Гидрогеологическое районирование

■ Алтае-Саянская гидрогеологическая складчатая область

■ Западно-Сибирский артезианский бассейн

Рис. 1. Схема размещения пунктов гидрологических наблюдений (номера пунктов приведены в табл. 1).

проводятся многолетние исследования подземных и поверхностных источников водоснабжения г. Томск и условий их формирования [16, 17, 31]. Ниже изложены результаты одного из этапов этих исследований в рамках работ по оценке защищенности подземных вод, используемых для водоснабжения Томска и Томского района, — выявление связей между химическим составом и стоком подземных и речных вод.

Объекты исследования — подземные и речные воды в водосборах малых притоков р. Томь на участке ее нижнего течения: правобережные притоки — реки Киргизка (Большая Киргизка), Ушайка, Басандайка; левобережные притоки — реки Порос, Кисловка, Лебяжья (рис. 1). Выбор указанных объектов обусловлен следующими обстоятельствами.

Рассматриваемая территория охватывает две гидрогеологические структуры I порядка — Западно-Сибирский артезианский бассейн (ЗСАБ) и Алтае-Саянская гидрогеологическая складчатая область (АСГСО). Последняя структура включает гидрогеологическую структуру II порядка Алтае-Томский гидрогеологический массив [33].

Водосборы правобережных притоков (рр. Басандайка, Ушайка и часть Большой Киргизки) приурочены к АСГСО и границе южной тайги. Водосборы левобережных притоков (часть притока р. Большая Басандайка и рр. Порос, Кисловка, Лебяжья) — к ЗСАБ и лесостепи. Приближенное гидрогеологическое строение можно представить в виде сочетания водоносных отложений (сверху вниз):

1) в левобережье Томи — неоген-четвертичного и палеогенового (ниже палеогенового комплекса залегают меловой, характеризующийся заметно большим содержанием в подземных водах растворенных солей; у Томи к поверхности выходят образования палеозоя, в водосборе р. Лебяжья более существенно распространение водоносных отложений неогена);

2) в правобережье Томи — отложения четвертичного, палеогенового, мелового и палеозойского возрастов.

По данным, опубликованным в бюллетенях о состоянии геологической среды на территории СФО (ФГБУ «Гидроспецгеология» и Сибирский региональный центр ФГБУ «Гидроспецгеология»), в геологическом разрезе ЗСАБ наглядно выделяется складчатый фундамент, сложенный породами доюрского возраста, и чехол, образованный платформенными полого залегающими терригенными осадками мезозоя и кайнозоя. В разрезе мезойско-кайнозойского бассейна располагаются два гидрогеологических этажа с отличительными особенностями формирования подземных вод. Этажи разделены мощным региональным водоупором верхнемелового-палеогенового возраста, который выклинивается в краевой зоне бассейна. Верхний гидрогеологический этаж представляет собой многослойную фациально изменчивую толщу, включающую более 30 водоносных горизонтов, приуроченных к палеогеновым, неогеновым и четвертичным отложениям. Этаж характеризуется свободным водообменом, однако, интенсивность водообмена с глубиной снижается и в нижней части этажа становится затруднительным [33].

Гидрогеологические условия АСГСО (Алтае-Томский ГМ II порядка) характеризуются также наличием двух гидрогеологических этажей (верхний приурочен к рыхлым мезо-кайнозойским отложениям, нижний — к палеозойским и протерозойским породам различного генезиса) и широ-

ким распространением трещинно-жильных вод. Поровые воды развиты в основном в четвертичных отложениях речных долин и прилегающих территорий. Наиболее подробно геологическая и гидрогеологическая информация изложена в многочисленных публикациях различных авторов и организаций [2–4, 8, 19, 25, 33].

Непосредственно Томский подземный водозабор эксплуатирует водоносные горизонты в отложениях палеогенового возраста в пределах Обь-Томского междуречья, в том числе, в границах водосборов рек Кисловка и, особенно, Порос. Водосбор Лебяжьей расположен к югу от области питания Томского водозабора. Северский подземный водозабор находится в водосборе правобережного притока Томи – р. Киргизка, и также эксплуатирует палеогеновый комплекс. Река Ушайка протекает через весь г. Томск, и в ее водосборе расположены достаточно крупный водозабор (Академический) и значительное количество одиночных скважин. В реки Киргизка и Ушайка поступает поверхностный сток с городской территории, пригородных населенных пунктов, крупных предприятий и значительный объем сточных вод (от нормативно-чистых до неочищенных). В водосборе Басандайки забор речных и подземных вод, сброс стоков проводится, но в меньших объемах, по сравнению с Ушайкой и Большой Киргизкой [8, 17, 31, 33].

Таким образом, рассматриваемая территория площадью около 5000 км² характеризуется заметным разнообразием природных и антропогенных условий формирования подземных и речных вод, а количество водосборов соответствует нижней границе применимости статистических методов анализа согласно [34]. Это позволяет попытаться выявить количественные взаимосвязи между подземными водами, используемыми для водоснабжения более чем полумиллиона человек, и водами малых рек. Количество последних по объективным причинам фиксированное и не может быть произвольно увеличено.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Гидрологические наблюдения на сети Росгидромета в настоящее время проводятся на Басандайке в створе п. Басандайка (сейчас – южная часть г. Томска), Поросе у с. Зоркальцево и Лебяжьей у с. Безменово, ранее выполнялись на Ушайке у п. Степановка, Кисловке у п. Тимирязево (сейчас – микрорайоны г. Томска), Киргизка у п. Кузовлево. Гидрологические работы на рр. Порос и Кисловка проводились ранее при переоценке запасов Томского водозабора специалистами Сибирского регионального центра ГМСН – филиала ФГБУ “Гидроспецгеология”, АО “Томскгеомониторинг”, Томской геолого-

разведочной экспедиции (ТГРЭ). Этими же организациями выполнялись и выполняются в настоящее время наблюдения за уровнями и химическим составом подземных вод на государственной и локальной наблюдательных сетях [1, 10, 16, 17, 33, 38]. Значительный объем геохимической информации получен в ТПУ и Томском филиале Института геологии и геофизики нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук (ТФ ИГГНГ СО РАН) [8, 9, 11, 12, 14, 24, 30, 39, 40]. Указанные материалы и послужили информационной основой исследования.

В основу концепции исследования положен анализ взаимосвязей между количеством и составом атмосферных, речных и подземных вод при допущении, что на рассматриваемой территории в зимний период (сезонные снежный покров и промерзание верхнего слоя грунтов на глубину до 2.0–2.2 м) речной сток формируется за счет подземных вод. В составе атмосферных осадков рассмотрены дождевые и снеготалые воды, а в составе подземных (согласно представлениям, изложенным в [40]) – грунтовые (безнапорные и слабонапорные воды первого от поверхности водоносного горизонта в зоне полного насыщения) и артезианские (напорные воды, залегающие между водоупорными слоями), включая грунтовые и артезианские воды зоны трещиноватости.

Методика исследования включала пять основных этапов:

- 1) расчет средних значений показателей химического состава подземных (грунтовых и артезианских), речных и атмосферных (дождевых и снеготалых) вод;
- 2) оценку элементов водного баланса водосборов исследуемых рек в среднем за многолетний период;
- 3) расчет подземной составляющей суммарного речного стока и выделение в ней долей водопритока из основных водоносных комплексов;
- 4) оценку элементов геохимического баланса водосборов в среднем за многолетний период;
- 5) выявление связей между элементами водного и геохимического балансов.

На первом этапе было выполнено обобщение данных о содержаниях главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^-), Fe, Si, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , величинах перманганатной окисляемости (ПО), pH, сухого остатка и удельной электропроводности, полученных в аккредитованных лабораториях Росгидромета, ТПУ, ТГРЭ, АО “Томскгеомониторинг” сопоставимыми или одинаковыми аттестованными методами. Более подробная информация о методиках отбора и подготовки проб, методов их анализа приведена в [23, 31].

Статистический анализ геохимической информации включал:

1) расчет среднего арифметического A , коэффициентов корреляции r и погрешностей их определения δ_A и δ_r (1, 2);

2) проверку на однородность выборок из разных водосборов по сумме главных ионов с использованием критериев Стьюдента (3) и Фишера (4) при уровне значимости $\alpha = 5\%$;

3) выявление регрессионных зависимостей вида

$$f(\Phi) = k_0 + \sum_{i=1}^m k_i f(Ar_i),$$

при условии: $|k_i| \geq 2\delta_k$, $|r| \geq 0.7$, где $f(\Phi)$ и $f(Ar)$ – функции от искомой величины Φ и ее аргументов; k_i и δ_k – коэффициенты регрессии и погрешности их определения, $i = 0, \dots, m$ [26, 34]:

$$\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (1)$$

$$\delta_r \approx \frac{1-r^2}{\sqrt{N-2}}, \quad (2)$$

$$Kr_S = \frac{|A(\Phi_1) - A(\Phi_2)|}{\sqrt{N_1\sigma_1^2 + N_2\sigma_2^2}} \sqrt{\frac{N_1N_2(N_1 + N_2 - 2)}{(N_1 + N_2)}}, \quad (3)$$

$$Kr_F = \frac{\max(\sigma_1^2; \sigma_2^2)}{\min(\sigma_1^2; \sigma_2^2)}, \quad (4)$$

где Kr_S и Kr_F – фактические значения критериев Стьюдента и Фишера; N – объем выборки; индексы 1 и 2 соответствуют произвольно выбранным номерам сравниваемых выборок, для каждой из которых рассчитаны среднее арифметическое $A(\Phi_j)$ и стандартное отклонение σ_j .

Второй этап предусматривал использование уравнений (5)–(9) при допущении отсутствия значимых изменений влагозапасов в водосборе в среднем за многолетний период:

$$P_y - E_y - Y_y = P_r + P_{sn} - E_{wp} - E_{cp} - Y_g - Y_{sf} \approx 0, \quad (5)$$

$$E_{cp} = \sum_{T_a < 0} 0.34 \cdot d_{a,i} m_i, \quad (6)$$

$$E_{wp} = (P_y - Y_y) - E_{cp} = E_y - E_{cp}, \quad (7)$$

$$Y_{g,i} = \begin{cases} Y_i, & i = (12, 1, 2, 3), \\ Y_3 + (Y_{12} - Y_3) \frac{(i-3)}{9}, & i = (4-12), \end{cases} \quad (8)$$

$$Y_{sf} = Y_y - \sum_{i=1}^{12} Y_{g,i}, \quad (9)$$

где P_y, P_r, P_{sn} – слой атмосферных осадков в целом за год, а также виде дождя и снега, соответственно, мм/год; E_y, E_{wp}, E_{cp} – слой суммарного испарения с поверхности водосбора в целом за год, в теплый (ориентировочно, по условию $T_a \geq 0^\circ\text{C}$;

T_a – среднемесячная температура приземных слоев атмосферного воздуха) и холодный период ($T_a < 0^\circ\text{C}$), мм/год; i – номер месяца; Y_y, Y_i – слой суммарного речного стока за год, мм/год, и за i -й месяц календарного года, мм/мес; Y_g, Y_{sf} – подземная и поверхностная составляющие суммарного речного стока за год, мм/год; $Y_{g,i}$ – слой подземного стока за i -й месяц календарного года, мм/мес; $d_{a,i}$ – дефицит влажности атмосферного воздуха за i -й месяц, гПа; m_i – количество суток в i -м месяце.

Слой речного стока вычислен по измеренным месячным расходам воды Q_i за период с 1970 до 2000 г., либо до завершения режимных наблюдений [28]. Данные об атмосферных осадках, температуре воздуха и дефиците влажности приняты по данным [20] с учетом требований [35] для рек Киргизка, Ушайка, Басандайка, Порос, Кисловка – по метеостанции Томск; для р. Лебяжья – по метеостанции Болотное.

На третьем этапе использовался метод смешения в виде:

$$Q_{g2} = Q_g \frac{(S_{rw} - S_{g1})}{(S_{g2} - S_{g1})}, \quad (10)$$

$$Q_{g1} = Q_g - Q_{g2}, \quad (11)$$

где $Q_g = Y_g$ – среднегодовой расход подземных вод, рассчитанный по (8); Q_{g1} и Q_{g2} – составляющие подземного стока, соответствующие притоку грунтовых и артезианских подземных вод; для всех исследуемых рек Q_{g1} соответствует притоку из водоносных отложений четвертичного и неоген-четвертичного возраста (в случае р. Лебяжьей), а Q_{g2} – из водоносного комплекса палеогена с возможным притоком вод из отложений мела (рр. Киргизка, Порос, Кисловка) и образований каменноугольного периода (частично – рр. Киргизка и Кисловка; в значительной степени – рр. Ушайка и Басандайка); S_{rw}, S_{g1}, S_{g2} – средние значения суммы главных ионов в речных водах в зимний период, в грунтовых и артезианских подземных водах.

В расчетах использованы измеренные значения концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} в речных водах в весенний, летне-осенний и зимний периоды (границы сезонов приняты по рекомендациям Государственного гидрологического института Росгидромета: весенний – с апреля по июнь, зимний – с декабря по март, когда гарантированно устанавливается ледостав на реках и устойчивый снежный покров на водосборе), концентрации главных ионов в грунтовых и артезианских водах (разделение на грунтовые и артезианские выполнено по данным о скважинах). Основная база данных по результатам химического анализа проб сформирована

лась по режимным и разведочным скважинам. Информация по ним принята по данным Томской геолого-разведочной экспедиции [10], АО “Томскгеомониторинг” и Сибирского регионального центра ФГБУ “Гидроспецгеология”. Сведения по отдельным пунктам, рассмотренным в ходе научных исследований, приняты по опубликованным работам [8, 9, 11, 12, 14]. По данным об измеренных концентрациях главных ионов рассчитана их сумма по срокам наблюдений, а уже по этим данным – средние значения S_{rw} , S_{g1} и S_{g2} .

Выбор именно суммы главных ионов в качестве гидрохимического показателя смещения подземных вод из разных водоносных отложений обусловлен относительной его устойчивостью к колебаниям концентраций отдельных ионов и погрешностей их определения.

Для рассматриваемой территории расчеты методом смещения проведены для годового баланса в среднем за многолетний период. Для условий конкретного года соотношение грунтовых и артезианских вод в питании рек изменчиво в течение года. Сезонные изменения в среднем за многолетний период намного меньше сезонных изменений состава речных вод [16].

Четвертый этап исследования предусматривал составление и анализ уравнения геохимического баланса водосбора в виде:

$$G_Y = S_Y Q_Y t b_1 = F(P_r S_r + P_{sn} S_{sn}) b_2 \pm \Delta G = G_r + G_{sn} \pm \Delta G, \quad (12)$$

где G_Y – годовой суммарный сток растворенных солей в замыкающем створе исследуемой реки, т/год; Q_Y – среднегодовой расход воды, м³/с; t – количество секунд в расчетном периоде (году); F – площадь водосбора, км²; S_Y , S_r , S_{sn} – средние значения суммы главных ионов в речных, дождевых и снеготалых водах; P_r , P_{sn} – то же, что в (5); ΔG – результат поступления солей из почвогрунтов, болот, хозяйственных объектов и их аккумуляции в водосборе; b_1 , b_2 – коэффициенты разности.

Положительное значение ΔG в первом приближении свидетельствует о преобладании процессов растворения и выщелачивания горных пород, а отрицательное – о преобладании аккумуляции веществ в водосборе. Значения S_Y , S_r , S_{sn} получены в результате обобщения фондовых и опубликованных данных Росгидромета, ТПУ, АО “Томскгеомониторинг”, ТГРЭ [30, 31] при тех же условиях, что и для S_{rw} , S_{g1} , S_{g2} .

В уравнении геохимического баланса в среднем для однородного периода должно быть уравновешено, однако для рассматриваемой водосборной территории уравнение баланса включает

в себя не все элементы, поскольку предполагается косвенная оценка недостающих элементов.

На заключительном, пятом этапе выполнялся статистический анализ полученных данных с учетом (1)–(4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследуемые подземные, речные и атмосферные воды в среднем пресные, гидрокарбонатные кальциевые. Наименьшее суммарное содержание растворенных солей закономерно отмечается в атмосферных водах, наибольшее – в подземных водах, обычно – в артезианских (табл. 1). При этом необходимо отметить, что проверка на однородность по среднему и дисперсии позволила сделать вывод о статистической сопоставимости подземных вод (и грунтовых, и артезианских) по сумме главных ионов (а также по модулю суммарного водного стока) только для водосборов рек Ушайка и Басандайка (табл. 2). Для речных вод наибольшие значения суммы главных ионов (Σ), сопоставимые со значениями для подземных вод, характерны для периода ледостава.

Анализ элементов водного баланса водосборов исследуемых рек показал, что значительная часть суммарного и, особенно, поверхностного стока сформирована снеготалыми водами, а для водосборов рек Порос, Кисловка, Лебяжья – практически полностью. Это связано с тем, что, во-первых, в теплый период большая часть атмосферных осадков тратится на суммарное испарение (с привлечением влагозапасов, сформированных в период снеготаяния). Во-вторых, в водосборах левобережных притоков Томи в пределах лесостепной зоны суммарное испарение выше, чем в водосборах правобережных притоков (табл. 3). Это сказывается на абсолютных значениях стока (рис. 2) и его внутригодовой изменчивости, для оценки которой использован коэффициент вариации месячного стока $C_v(Y_m)$.

При этом необходимо отметить, что с увеличением $C_v(Y_m)$ наблюдается хорошо выраженное увеличение доли поверхностного стока и, соот-

ветственно, уменьшение доли подземного $\frac{Q_g}{Q_a}$ (%):

$$\frac{Q_g}{Q_a} = (75.02 \pm 7.03) -$$

$$- (33.00 \pm 4.53) C_v(Y_m); \quad r = -0.96 \pm 0.04, \quad (13)$$

где $r \pm \delta_r$ – коэффициент корреляции и погрешность его определения, оцениваемая по формуле (2). Также отмечено увеличение в подземной составляющей вклада грунтовых вод $\frac{Q_{g1}}{Q_g}$ (%) и

Таблица 1. Среднеголетние значения суммы главных ионов в речных и подземных водах и погрешности их определения (1), мг/дм³

№	Река – пункт	S_Y	S_{rw}	S_{g1}	S_{g2}
1	р. Киргизка – п. Кузовлево	366.4 ± 24.9	509.4 ± 64.5	460.8 ± 24.4	540.2 ± 27.2
2	р. Ушайка – п. Степановка	406.0 ± 19.9	568.0 ± 78.8	457.4 ± 25.6	572.7 ± 19.1
3	р. Басандайка – п. Басандайка	453.8 ± 25.6	497.3 ± 38.5	375.2 ± 59.0	527.9 ± 20.4
4	р. Порос – с. Зоркальцево	185.2 ± 23.1	509.2 ± 63.4	504.7 ± 32.9	535.0 ± 11.2
5	р. Кисловка – п. Тимирязево	330.3 ± 11.6	385.1 ± 22.6	223.7 ± 6.6	444.5 ± 26.7
6	р. Лебяжья – с. Безменово	502.7 ± 34.0	559.5 ± 37.8	326.9 ± 47.4	566.8 ± 67.7

Примечание: S_Y , S_{rw} , S_{g1} , S_{g2} – средние значения суммы главных ионов в речных водах в среднем за год, в зимний период, в грунтовых и артезианских подземных водах по результатам обобщения фондовых данных ТПУ и опубликованных данных [11, 17, 22, 23, 31, 32, 40]; средние значения суммы главных ионов в дождевых S_r и снеготалых S_{sn} водах приняты по фондовым материалам ТПУ и опубликованным данным [30] в целом для рассматриваемой территории: $S_r = 90.7 \pm 9.1$ мг/дм³; $S_{sn} = 21.6 \pm 2.5$ мг/дм³.

Таблица 2. Соотношения фактических (f) и критических (при уровне значимости 5%) значений критериев Стьюдента (Kr_S) и Фишера (Kr_F) при сравнении данных о сумме главных ионов в грунтовых и артезианских подземных вод в водосборах притоков Томи и модулей суммарного водного стока

Сравниваемые водосборы		Критерий	Сумма главных ионов		Модуль суммарного стока
			Грунтовые воды	Артезианские воды	
Киргизка	Ушайка	$Kr_S(f)/Kr_S(5\%)$	0.05	0.48	0.06
		$Kr_F(f)/Kr_F(5\%)$	0.40	1.09	0.28
Киргизка	Басандайка	$Kr_S(f)/Kr_S(5\%)$	0.74	0.17	0.20
		$Kr_F(f)/Kr_F(5\%)$	0.79	1.11	0.44
Басандайка	Ушайка	$Kr_S(f)/Kr_S(5\%)$	0.70	0.79	0.28
		$Kr_F(f)/Kr_F(5\%)$	0.75	0.48	0.54
Порос	Кисловка	$Kr_S(f)/Kr_S(5\%)$	4.65	1.68	1.68
		$Kr_F(f)/Kr_F(5\%)$	0.57	0.60	0.92
Порос	Лебяжья	$Kr_S(f)/Kr_S(5\%)$	1.40	0.39	2.45
		$Kr_F(f)/Kr_F(5\%)$	0.34	1.71	1.36
Лебяжья	Кисловка	$Kr_S(f)/Kr_S(5\%)$	1.43	0.90	0.90
		$Kr_F(f)/Kr_F(5\%)$	0.73	0.93	0.64
(Ушайка–Басандайка)	(Кисловка–Лебяжья)	$Kr_S(f)/Kr_S(5\%)$	–	–	6.21
		$Kr_F(f)/Kr_F(5\%)$	–	–	2.72

Примечание: расчет фактических значений критериев Стьюдента и Фишера по формулам (3, 4); при отношении $Kr(f)/Kr(5\%) > 1$ гипотеза однородности выборочных средних и дисперсий отвергается с уровнем значимости 5%.

снижение вклада напорных $\frac{Q_{g2}}{Q_g}$ (%), что, видимо, объясняется ухудшением условий поступления подземных вод из более глубоких горизонтов при уменьшении общего подземного стока:

$$\frac{Q_{g1}}{Q_g} = (43.25 \pm 18.44) + (25.73 \pm 11.88)Cv(Y_m); \quad r = 0.73 \pm 0.23, \quad (14)$$

$$\frac{Q_{g2}}{Q_g} = (56.75 \pm 18.44) - (25.73 \pm 11.88)Cv(Y_m); \quad r = -0.73 \pm 0.23. \quad (15)$$

Одновременно с увеличением $Cv(Y_m)$, уменьшением подземной составляющей и вклада напорных вод возрастают значения суммы главных ионов в речных водах в зимний период и подземных напорных водах (см. табл. 3).

Таблица 3. Среднегодовое значения элементов водного баланса водосборов рек Большая Киргизка, Ушайка, Басандайка, Порос, Кисловка, Лебяжья и суммы главных ионов в речных, подземных и атмосферных водах

Река – пункт	F	Q_a	$Cv(Y)$	Q_g/Q_a	Q_{g1}/Q_g	Q_{g2}/Q_g	Y_g	Y_{sf}	E_y	$E_{\geq 0}$	$(P-E)_{\geq 0}$	$(P-E)_{< 0}$
	км ²	м ³ /с	–	%			мм/год					
р. Киргизка – п. Кузовлево	825	5.14	1.32	36	61	39	70	126	395	366	40	156
р. Ушайка – п. Степановка	713	4.25	1.67	16	96	4	30	158	403	374	32	156
р. Басандайка – п. Басандайка	402	2.61	1.47	23	80	20	47	158	386	358	48	156
р. Порос – с. Зоркальцево	316	0.45	1.31	30	85	15	13	32	546	517	-111	156
р. Кисловка – п. Тимирязево	458	0.75	1.08	42	73	27	22	30	539	510	-104	156
р. Лебяжья – с. Безменово	1390	3.57	2.21	5	97	3	4	77	445	420	-48	129

Примечание: F – площадь водосбора; Q_a – среднегодовое количество воды; $Cv(Y)$ – коэффициент вариации месячного стока; Q_g/Q_a – подземная составляющая среднегодового расхода воды; Q_{g1}/Q_g и Q_{g2}/Q_g – доля грунтовых и напорных вод в подземном стоке; Y_g и Y_{sf} – подземная и поверхностная составляющие слоя годового водного стока; E_y и $E_{\geq 0}$ – суммарное испарение за год и теплый период; $(P-E)_{\geq 0}$ и $(P-E)_{< 0}$ – разность между атмосферным увлажнением и испарением в теплый и холодный периоды.

Это указывает на обратную зависимость общего содержания растворенных солей от интенсивности водообмена, которая в рассматриваемых условиях (избыточная или нормальная увлажненность территории) связана с долей подземного стока $\frac{Q_g}{Q_a}$: чем она больше – тем выше связь различных водоносных горизонтов и поверхностных водных объектов.

Напротив, при снижении величины $\frac{Q_g}{Q_a}$ возрастает “закрытость” глубоких водоносных горизонтов, увеличивается время взаимодействия вод этих горизонтов с горными породами и, соответственно, увеличивается сумма главных ионов в артезианских подземных водах S_{g2} :

$$S_{g2} = (146.58 \pm 48.35) - (0.23 \pm 0.09) \frac{Q_g}{Q_a}; \quad r = -0.78 \pm 0.19; \quad (16)$$

$$S_{g2} = (402.21 \pm 62.31) + (85.46 \pm 40.16)Cv(Y_m); \quad r = 0.73 \pm 0.23. \quad (17)$$

Интересная особенность выявлена в структуре геохимического баланса – для водосборов левых притоков Томи (Порос, Кисловка, Лебяжья) величина ΔG в уравнении (12) значительно меньше, чем для правых притоков (Киргизка, Ушайка, Басандайка), причем положительные значения ΔG отмечены при слое поверхностного стока $Y_{sf} > 63$ мм/год и отрицательных значениях величины $(P-E)_{\geq 0}$ (рис. 3, табл. 3, 4).

Отрицательные значения ΔG можно интерпретировать как общее преобладание в левобережной части водосбора Томи на участке ее нижнего

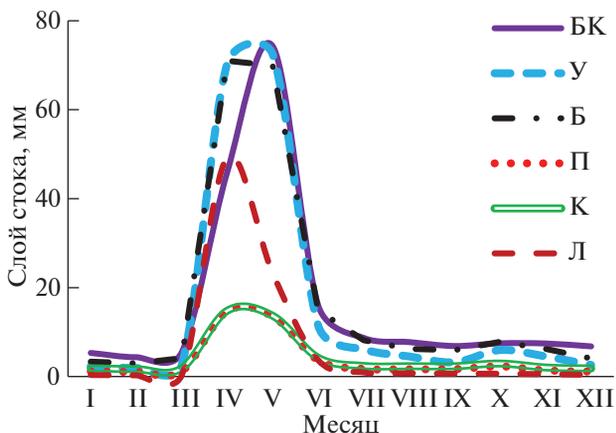


Рис. 2. Внутригодовое изменение месячного слоя стока рек Киргизка (Большая Киргизка – БК), Ушайка (У), Басандайка (Б), Порос (П), Кисловка (К) и Лебяжья (Л) в среднем за многолетний период.

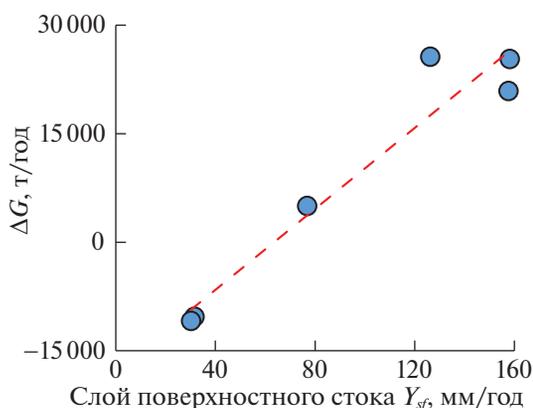


Рис. 3. Соотношение между величиной ΔG и слоем поверхностного стока Y_{sf} в водосборах притоков Томи на участке ее нижнего течения.

Таблица 4. Среднемноголетние значения элементов водного баланса водосборов рек Киргизка, Ушайка, Басандайка, Порос, Кисловка, Лебяжья, т/год

Река – пункт	G_r	G_{sn}	G_{Ysum}	G_{Yg}	G_{Ysf}	ΔG
р. Киргизка – п. Кузовлево	30380	3297	59345	29421	29923	25668
р. Ушайка – п. Степановка	26256	2849	54448	12111	42337	25343
р. Басандайка – п. Басандайка	14803	1606	37337	9386	27951	20927
р. Порос – с. Зоркальцево	11636	1263	2635	2161	474	-10264
р. Кисловка – п. Тимирязево	16865	1830	7851	3830	4021	-10845
р. Лебяжья – с. Безменово	46899	4624	56544	3202	53342	5021

Примечание: G_r и G_{sn} – поступление растворенных солей в водосбор с дождевыми и снеготальными водами; G_{Ysum} , G_{Yg} , G_{Ysf} – суммарный сток растворенных солей в замыкающем створе реки, его подземная и поверхностная составляющие; ΔG – результат растворения и выщелачивания горных пород и аккумуляции веществ в водосборе.

течения процессов аккумуляции веществ, поступающих с атмосферными осадками. Напротив, положительные значения ΔG в водосборах рек Киргизка, Ушайка и Басандайка, видимо, свидетельствуют о более значительной роли процессов выщелачивания и растворения горных пород на фоне значимого пополнения влагозапасов в теплый период, при котором происходит не только пополнение ресурсов подземных вод, но и формирование поверхностного стока.

При этом необходимо отметить, что в правобережной северной части водосбора Томи расположен ряд рудопроявлений и месторождений твердых полезных ископаемых с присутствием в составе грунтов редкоземельных элементов (РЗЭ). В левобережной северной части водосбора Томи рудопроявления не отмечены, но выявлено присутствие РЗЭ в подземных водах и отложениях, сформированных в процессе обезжелезивания подземных вод Обь-Томского междуречья (включая водосборы рек Кисловка и Порос) [7, 21–23, 36]. Можно предположить, что примерно такой же механизм функционировал и в предыдущие геологические периоды, в том числе в периоды с отличной от современной гидрографической сетью [18]. Вследствие этого сформированы геохимические ореолы с центрами в северной части Колывань-Томской складчатой зоны и, возможно, северной части Кузнецкого Алатау.

Горизонтальные проекции этих ореолов в целом сопоставимы с полученными в ТПУ выводами о закономерностях трансформации минерального и химического состава донных отложений рек Северной и юго-Восточной Азии:

1) основные изменения минерального состава донных отложений связаны с возрастанием доли кварца от истоков к устьям рек протяженностью более 11 км и снижением вклада минералов, для которых логарифм произведения плотности и твердости не превышает 1.27;

2) участки рек с условно однородным минеральным составом донных отложений смещены

(ниже по течению) относительно участков с условно однородным (или слабо меняющимся в многолетнем разрезе) химическим составом речных вод до 100 км [32].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере шести малых рек – притоков р. Томь (второй крупнейший приток Оби, Западная Сибирь) – подтверждены известные выводы о том, что при снижении интенсивности водообмена увеличивается время взаимодействия в системе вода – порода и, соответственно, суммарное содержание в подземных водах растворенных солей [5, 13, 39].

При этом впервые для участка нижнего течения Томи показано, что, во-первых, степень взаимосвязанности речных, подземных грунтовых и артезианских вод может быть оценена с помощью коэффициента вариации $Cv(Y_m)$ месячных значений слоя стока малых рек – чем больше значение $Cv(Y_m)$, тем больше “закрытость” глубоких водоносных горизонтов и минерализация подземных вод.

Во-вторых, для территорий со значительным пополнением влагозапасов в теплый период года, при котором формируется не только подземный, но и поверхностный сток, преобладают процессы выщелачивания и растворения горных пород по сравнению с аккумуляцией солей, поступающих на водосбор с атмосферными осадками.

Для территорий, в пределах которых пополнение ресурсов подземных вод связано в основном в период снеготаяния, при формировании химического состава подземных вод более значительную роль играют процессы поступления веществ извне, что целесообразно учитывать при проектировании зон санитарной охраны подземных водозаборов и контроле хозяйственной деятельности в пределах области питания подземных вод.

В-третьих, по комплексу геохимических, гидрологических и гидрогеологических показателей

на территории водосбора Томи на участке ее нижнего течения (в пределах Томской области) и с учетом ранее выполненных исследований [9, 11, 12, 24, 31, 40] можно выделить три района по минерализации и химическому составу грунтовых и артезианских вод, их связи с речными водами:

1) правобережье Томи от границы Томской и Кемеровской областей до водораздела рек Ушайка и Киргизка (ориентировочно – Иркутский тракт в черте г. Томска);

2) правобережье к северу от водосбора Киргизки (включительно);

3) левобережье Томи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (18-55-80015) и Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Балобаненко А.А.* Геохимические особенности подземных вод хозяйственно-питьевого назначения юга Западно-Сибирского артезианского бассейна: автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. Томск: Томский политехн. ун-т, 2018. 22 с.
2. *Гидрогеология СССР. Т. 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / Под ред. В. А. Нуднера. М.: Недра, 1970. 368 с.*
3. *Гидрогеология СССР. Т. 17. Кемеровская область и Алтайский край. М.: Недра, 1972. 398 с.*
4. *Гудымович С.С., Рычкова И.В., Рябчикова Э.Д.* Геологическое строение окрестностей г. Томска (территории прохождения геологической практики). Томск: Томский политехн. ун-т, 2009. 84 с.
5. *Гусева Н.В.* Механизмы формирования химического состава природных вод в различных ландшафтно-климатических зонах горно-складчатых областей центральной Евразии: автореф. дис. ... док. геол.-мин. наук. Томск: Томский политехн. ун-т, 2018. 43 с.
6. *Гриневский С.О.* Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод. М.: Инфра-М, 2019. 152 с.
7. *Домаренко В.А., Савичев О.Г., Перегудина Е.В., Лепокурова О.Е., Вильгельм Е.А.* Вещественный состав донных отложений реки Омутная в пределах Туганского россыпного узла (Томская область) // Разведка и охрана недр. 2020. № 4. С. 48–53.
8. *Дутова Е.М., Вологодина И.В., Покровский Д.С., Заморская Л.В.* Изменение гидрогеохимических условий при эксплуатации Академического месторождения // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 1. С. 59–63.
9. *Дутова Е.М., Наливайко Н.Г.* Особенности химического и микробиологического состава подземных вод территории города Томска // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2011. № 5. С. 56–61.
10. *Ермашова Н.А.* Природный гидрогеохимический фон верхней гидродинамической зоны Среднего Приобья как основа оценки ее экологического состояния // Обской вестник. 1999. № 3–4. С. 106–112.
11. *Колоколова О.В.* Геохимия подземных вод района Томского водозабора: автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. Томск: Томский политехн. ун-т, 2003. 21 с.
12. *Колубаева Ю.В., Шварцев С.Л., Копылова Ю.Г.* Геохимия вод северной части Кольвань-Томской складчатой зоны // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2010. № 2. С. 50–58.
13. *Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеиц В.М.* Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М.: Наука, 2004. 677 с.
14. *Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Шварцев С.Л., Колубаева Ю.В., Наливайко Н.Г.* Химический и микробиологический состав подземных вод децентрализованного водоснабжения южных и центральных районов Томской области // Известия Томский политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 5. С. 29–41.
15. *Лисецкий В.Н., Брюханцев В.Н., Андрейченко А.А.* Улавливание и утилизация осадков водоподготовки на водозаборах г. Томска. Томск: Изд-во НТЛ, 2003. 164 с.
16. *Льготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В., Камнева О.А.* Долгосрочная изменчивость химического состава подземных вод Томской области // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 74–79.
17. *Льготин В.А., Савичев О.Г., Нигороженко В.Я.* Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2000–2005 гг. Томск: АГРАФ-ПРЕСС, 2006. 88 с.
18. *Малолетко А.М.* Эволюция речных систем Западной Сибири в мезозое и кайнозое. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2008. 288 с.
19. *Мананков А.В., Парначев В.П.* Геоэкологические аспекты состояния поверхностных и подземных вод г. Томска // Обский вестник. 1999. № 1–2. С. 105–116.
20. *Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6, Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1993. 718 с.*
21. *Недра России. Т. 1. Полезные ископаемые / Под ред. Н.В. Межеловского и А.А. Смыслова. СПб.-М.: Горн. ин-т, Межрегион. центр по геол. картографии, 2001. 547 с.*
22. *Пасечник Е.Ю., Гусева Н.В., Савичев О.Г., Льготин В.А. и др.* Микроэлементный состав подземных вод верхней гидродинамической зоны в бассейне Верхней Оби как фактор формирования их эколого-геохимического состояния // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 4. С. 54–63. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/4/2593>
23. *Пасечник Е.Ю., Савичев О.Г., Домаренко В.А., Владмирова О.Н.* Редкоземельные элементы в по-

- верхностных и подземных водах верхней гидрогеодинамической зоны в бассейне Верхней и Средней Оби (Западная Сибирь) // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2020. Т. 32. С. 113–127.
24. *Пасечник Е.Ю.* Эколого-геохимическое состояние природных сред территории города Томска // Вестник Томск. гос. ун-та. 2008. № 306. С. 149–154.
 25. *Покровский Д.С., Кузеванов К.И.* Гидрогеологические проблемы строительного освоения территории Томска // Обский вестник. 1999. № 1–2. С. 96–104.
 26. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 448 с.
 27. *Раткович Д.Я.* Актуальные проблемы водообеспечения. М.: Наука, 2003. 352 с.
 28. Региональная электронная гидрографическая сеть для арктического региона. URL: <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>.
 29. *Рогов Г.М., Попов В.К., Осипова Е.Ю.* Проблемы использования природных вод бассейна реки Томи для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Томск: Изд-во Томск. гос. архит.-строит. ун-та, 2003. 218 с.
 30. *Савичев О.Г., Иванов А.О.* Атмосферные выпадения в бассейне Средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек // Известия РАН. Серия географическая. 2010. № 1. С. 63–70.
 31. *Савичев О.Г.* Водные ресурсы Томской области. Томск: Томск. политехн. ун-т, 2010. 248 с.
 32. *Савичев О.Г., Домаренко В.А., Перегудина Е.В., Лепкурова О.Е.* Трансформация минерального состава донных отложений от истоков к устьям рек // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 7. С. 43–56.
 33. Состояние геологической среды (недр) на территории Сибирского федерального округа в 2017 г. Информационный бюллетень. Томск: Филиал “Сибирский региональный центр ГМСН”, ФГБУ “Гидроспецгеология”, 2018. Вып. 14. 178 с.
 34. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 72 с.
URL: <http://sniprf.ru/sp33-101-2003>
 35. СП 131.13330.2018. Строительная климатология. Дата введения 2019-05-29. М.: Стандартинформ, 2019. 153 с.
URL: <http://base.garant.ru/72239302>
 36. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / Под ред. Е.Н. Трибунского, М.С. Паровинчака. Кемерово: ООО “Сапс”, 2001. 214 с.
 37. *Черепанский М.М.* Региональные гидрогеологические прогнозы влияния отбора подземных вод на речной сток: автореф. дис. ... док. геол.-мин. наук. М.: НИИ-Природа, Рос. гос. геологоразвед. ун-т, 2007. 49 с.
 38. *Янкович Е.П., Копылова Ю.Г., Гусева Н.В.* Распространенность геохимических типов подземных вод Обь-Томского междуречья // Политематический сетевой электронный журнал Кубанского аграрного университета. 2015. № 107 (03).
URL: <http://ej.kubargo.ru/2015/03/pdf/96.pdf>
 39. *Shvartsev S.L.* Geochemistry of fresh groundwater in main landscape zones of the earth // *Geochem. International*. 2008. V. 46. N 13. P. 1285–1398.
 40. *Shvartsev S.L., Serebrennikova O.V., Zdvizhkov M.A., Savichev O.G., Naimushina O.S.* Geochemistry of wetland waters from the lower Tom basin, Southern Tomsk oblast // *Geochemistry International*. 2012. V. 50. N 4. P. 367–380.
<https://doi.org/10.1134/S0016702912040076>

INTERRELATION BETWEEN RIVER AND GROUNDWATER IN THE LOWER REACHES OF THE TOM RIVER (TOMSK OBLAST, THE RUSSIAN FEDERATION)

O. N. Vladimirova^{a,#} and O. G. Savichev^{a,##}

^a *National Research Tomsk Polytechnic University, Engineering School for Natural Resources,
pr. Lenina 30, Tomsk, 634050 Russia*

[#] *E-mail: onv-2018@yandex.ru*

^{##} *E-mail: OSavichev@mail.ru*

The paper presents the results of studies in assessing the protection of groundwater used for water supply in Tomsk and the Tomsk region, and revealing the relationship between the chemical composition and flow of groundwater and river water. The underground and river water in the reservoirs of the small tributaries of the Tom River in the area of its lower course, i.e., its right-bank tributaries – Kirghiz (Big Kirghiz), Ushaika, and Basandaika rivers; and left-bank tributaries – Poros, Kislovka, and Lebyazhya rivers were the objects of research. The analysis of the interconnection between the amount and composition of atmospheric, river and ground water is carried out in the catchments of six small tributaries of the river Tom near Tomsk according to the long-term hydrogeological and hydrological observations (that lasted from the 1970s till 2019). With a decrease in the intensity of water exchange, the interaction time in the “water – rock” system increases and, accordingly, the total content of dissolved salts in groundwater increases. For the first time for the section of the lower course of the river Tom it is found out that the interconnection between river water, groundwater

and artesian water can be estimated using the variation coefficient C_v (Y_m) of monthly values of the runoff layer of small rivers: the higher C_v (Y_m) value is, the better deep aquifers are isolated and the higher mineralization of groundwater is. For territories with a significant replenishment of moisture reserves in the warm season (in the right-bank part of the Tom River catchment area), leaching and dissolution of rocks prevail; and for territories with a predominant replenishment of groundwater resources during snowmelt (in the left-bank part of the Tom River basin), the substances coming from outside, including atmospheric precipitation, play a more significant role.

Keywords: water balance, geochemical balance, interrelation between river and groundwater, Altai-Sayan folded area, West Siberian artesian basin, the Tom River tributaries, Tomsk

REFERENCES

- Balobanenko A.A. *Geokhimicheskie osobennosti podzemnykh vod khozyaistvenno-pit'evogo naznacheniya yuga Zapadno-Sibirskogo artezijskogo basseina* [Geochemical features of groundwater for household and drinking purposes in the south of the West Siberian artesian basin]. Extended abstract Cand. Sci. (Geol.-Min.) Diss. Tomsk, Tomsk Polytechnic Univ., 2018, 22 p. (in Russian)
- Gidrogeologiya SSSR. T. 16. Zapadno-Sibirskaya ravnina (Tyumenskaya, Omskaya, Novosibirskaya i Tomskaya oblasti)*. [Hydrogeology of the USSR. Vol. 16. The West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)]. Nudner, V.A. (ed.), Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p. (in Russian)
- Gidrogeologiya SSSR. T. 17. Kemerovskaya oblast i Altayskii kraj* [Hydrogeology of the USSR. Vol. 17. Kemerovo region and Altai kraj]. Moscow, Nedra Publ., 1972, 398 p. (in Russian)
- Gudymovich, S.S., Rychkova, I.V., Ryabchikova, E.D. *Geologicheskoe stroenie okrestnostei g. Tomsk (territorii prokhozhdeniya geologicheskoi praktiki)*. [The geological structure of the Tomsk city surroundings (geological field practice area)]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2009, 84 p. (in Russian)
- Guseva, N.V. *Mekhanizmy formirovaniya khimicheskogo sostava prirodnykh vod v razlichnykh landshaftno-klimaticheskikh zonakh gorno-skladchatykh oblastei tsentral'noi Evrazii* [The formation mechanisms of natural water chemical composition in various landscapes and climatic zones of orogenic areas in central Eurasia]. Extended abstract Doctoral (Geol.-Min.) Diss. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2018, 43 p. (in Russian)
- Grinevskii, S.O. *Gidrogeodinamicheskoe modelirovanie vzaimodeistviya podzemnykh i poverkhnostnykh vod* [Hydrogeodynamic modeling of the interaction between groundwater and surface water]. Moscow, Infra-M Publ., 2019, 152 p. (in Russian)
- Domarenko, V.A., Savichev, O.G., Peregudina, E.V., Lepokurova, O.E., Vil'gel'm, E.A. *Veshchestvennyi sostav donnykh otlozhenii reki Omutnaya v predelakh Tuganskogo rossypnogo uzla (Tomskaya oblast')* [The material composition of bottom sediments of the Omutnaya River within the Tugan placer deposit (Tomsk region)]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2020, no. 4, pp. 48–53. (in Russian)
- Dutova, E.M., Vologdina, I.V., Pokrovskii, D.S., Zamorovskaya, L.V. *Izmenenie gidrogeokhimicheskikh uslovii pri ekspluatatsii akademicheskogo mestorozhdeniya* [Change in hydrogeochemical conditions during the operation of an academic field]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2008, vol. 312, no. 1, pp. 59–63. (in Russian)
- Dutova, E.M., Nalivaiko, N.G. *Osobennosti khimicheskogo i mikrobiologicheskogo sostava podzemnykh vod territorii goroda Tomsk* [Features of the chemical and microbiological composition of groundwater in the territory of the Tomsk city]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2011, no. 5, pp. 56–61. (in Russian)
- Ermashova, N.A. *Prirodnyi gidrogeokhimicheskii fon verkhnei gidrodinamicheskoi zony Srednego Priob'ya kak osnova otsenki iye ekologicheskogo sostoyaniya* [Natural hydrogeochemical background of the upper hydrodynamic zone of the Middle Ob region as the basis for assessing its ecological state]. *Obshch. vestnik*, 1999, no. 3–4, pp. 106–112. (in Russian)
- Kolokolova, O.V. *Geokhimiya podzemnykh vod raiona Tomskogo vodozabara*. [Groundwater geochemistry of the Tomsk water intake area:] Extended abstract Cand. Sci. (Geol.-Min.) Diss. Tomsk, Tomsk Polytechnic Univ., 2003, 21 p. (in Russian)
- Kolubaeva, Yu.V., Shvartsev, S.L., Kopylova, Yu.G. *Geokhimiya vod severnoi chasti Kolyvan'-Tomskoi skladchatoi zon* [Geochemistry of water in the northern part of the Kolyvan-Tomsk folded zone]. *Geologiya i razvedka*, 2010, no. 2, pp. 50–58. (in Russian)
- Krainov, S.R., Ryzhenko, B.N., Shvets, V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Groundwater geochemistry. Theoretical, applied and ecological aspects]. Laverov, N.P., Ed. Moscow, Nauka Publ., 2004, 677 p. (in Russian)
- Lepokurova, O.E., Ivanova, I.S., Shvartsev, S.L., Kolubaeva, Yu.V., Nalivaiko, N.G. *Khimicheskii i mikrobiologicheskii sostav podzemnykh vod deitsentralizovannogo vodosnabzheniya yuzhnykh i tsentral'nykh raionov Tomskoi oblasti*. [The chemical and microbiological composition of groundwater in decentralized water supply in the southern and central regions of the Tomsk region]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2016, vol. 327, no. 5, pp. 29–41. (in Russian)
- Lisetskii, V.N., Bryukhantsev, V.N., Andreichenko, A.A. *Ulavlivanie i utilizatsiya osadkov vodopodgotovki na vodozaborakh g. Tomsk* [Collection and disposal of water treatment sludge at Tomsk water intakes]. Tomsk, NTL Pub., 2003, 164 p. (in Russian)
- L'gotin, V.A., Savichev, O.G., Makushin, Yu.V., Kamneva, O.A. *Dolgosrochnaya izmenchivost' khimicheskogo sostava podzemnykh vod Tomskoi oblasti* [Long-term variability of chemical composition of groundwater in the Tomsk region]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2012, no. 1, pp. 74–79. (in Russian)
- L'gotin, V.A., Savichev, O.G., Nigorozhenko, V.Ya. *Sostoyanie poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov, vodo-khozyaistvennykh sistem i sooruzhenii na territorii Tomskoi*

- oblasti v 2000–2005 gg.* [The state of surface water bodies, water management systems and structures in the Tomsk region in 2000–2005]. Tomsk, OAO “Tomsk-geomonitoring”, “AGRAF-PRESS”, 2006, no. 88, 112 p. (in Russian)
18. Maloletko, A.M. *Evolutsiya rechnykh sistem Zapadnoi Sibiri v mezozoe i kainozoe* [The evolution of river systems in Western Siberia in Mesozoic and Cenozoic]. Tomsk, Tomsk State Univ. Publ., 2008, 288 p. (in Russian)
 19. Manankov, A.V., Parnachev, V.P. *Geoekologicheskie aspekty sostoyaniya poverkhnostnykh i podzemnykh vod g. Tomsk* [Geoecological aspects of the state of surface and groundwater in Tomsk]. *Obskoi vestnik*, 1999, no. 1–2, pp. 105–116. (in Russian)
 20. *Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Chasti 1–6, Vyp. 20. Tomskaya, Novosibirskaya, Kemerovskaya oblasti, Altaiskii krai.* [Scientific and applied reference on the USSR climate. Series 3. Perennial data. Parts 1–6, vol. 20. Tomsk, Novosibirsk, Kemerovo regions, Altai krai]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1993, 718 p. (in Russian)
 21. *Nedra Rossii* [Bowels of Russia]. Vol. 1. Minerals. Mezhelevskii, N.V., Smyslov, A. A., Eds., St. Petersburg, Moscow, Mining Institute, Mezhsregion. Tsentr po geol. kartografii Publ., 2001, 547 p. (in Russian)
 22. Pasechnik, E.Yu., Guseva, N.V., Savichev, O.G., L’gotin, V.A., et al. [The microelement composition of groundwater in the upper hydrogeodynamic zone in the Upper Ob basin as a factor in the formation of their ecological and geochemical state]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo-Resource Engineering*. 2020, vol. 331, no. 4, pp. 54–63. doi: 10.18799/24131830/2020/4/2593
 23. Pasechnik, E.Yu., Savichev, O.G., Domarenko, V.A., Vladimirova, O.N. *Redkozemel’nye elementy v poverkhnostnykh i podzemnykh vodakh verkhnei gidrogeodinamicheskoi zony v basseine Verkhnei i Srednei Obi (Zapadnaya Sibir’)*. [Rare earth elements in the surface and groundwater of the upper hydrogeodynamic zone in the basin of the Upper and Middle Ob (Western Siberia)]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*. 2020, vol. 32, pp. 113–127. (in Russian)
 24. Pasechnik, E.Yu. *Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie prirodnykh sred territorii goroda Tomsk*. [Ecological and geochemical state of natural environment in Tomsk city]. *Vestnik Tomsk. gos. un-ta*. 2008, vol. 306, pp. 149–154. (in Russian)
 25. Pokrovskii, D.S., Kuzevanov, K.I. *Gidrogeologicheskie problemy stroitel’nogo osvoeniya territorii Tomsk* [Hydrogeological problems of the construction development of the Tomsk territory]. *Obskoi vestnik*, 1999, no. 1–2, pp. 96–104. (in Russian)
 26. *Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [A guide to determining the estimated hydrological characteristics]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984, 448 p. (in Russian)
 27. Ratkovich, D.Ya. *Aktual’nye problemy vodoobespecheniya* [Actual problems of water supply]. Moscow, Nauka Publ., 2003, 352 p. (in Russian)
 28. Rogov, G.M., Popov, V.K., Osipova, E.Yu. *Problemy ispol’zovaniya prirodnykh vod basseina reki Tomi dlya khozyaistvenno-pit’evogo vodosnabzheniya* [Problems of using natural water of the Tom River basin for drinking water supply]. Tomsk, Tomsk State Architecture and Construction University Publ., 2003. 218 p. (in Russian)
 29. *Regional’naya elektronnyaya gidrograficheskaya set’ dlya arkticheskogo regiona* [A regional electronic hydrographic data network for the Arctic region]. Available at: <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>
 30. Savichev, O.G., Ivanov, A.O. *Atmosfernye vypadeniya v basseine Sredney Obi i ikh vliyanie na gidrokhimicheskii stok rek* [Atmospheric precipitation in the Middle Ob River basin and their influence on the hydrochemical flow of rivers]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2010, no. 1, pp. 63–70. (in Russian)
 31. Savichev, O.G. *Vodnye resursy Tomskoi oblasti* [Water resources in the Tomsk region]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2010, 248 p. (in Russian)
 32. Savichev, O.G., Domarenko, V.A., Peregudina, E.V., Lepokurova, O.E. *Transformatsiya mineral’nogo sostava donnykh otlozhenii ot istokov k ust’yam rek* [Transformation of the mineral composition of bottom sediments from sources to river mouths]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2018, vol. 329, no. 7, pp. 43–56. (in Russian)
 33. *Sostoyanie geologicheskoi sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federal’nogo okruga v 2017 g. Informatsionnyi byulleten’* [Condition of geological environment (bowels) in the Siberian Federal okrug in 2017. News bulletin]. Tomsk, Filial “Sibirskii regional’nyi tsentr GMSN”, FGBU “Gidrospegeologiya”, 2018, vol. 14, 178 p. (in Russian)
 34. SP 33-1010-2003. *Opreделение osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of Rules 33-1010-2003. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p. URL: <http://sniprf.ru/sp33-101-2003>. (in Russian)
 35. SP 131.13330.2018. *Stroitel’naya klimatologiya*. [Building climatology]. Moscow, Standartinform, 2019, 153 p. URL: <http://base.garant.ru/72239302>. (in Russian)
 36. *Tsirkon-il’menitovye rossypnye mestorozhdeniya kak potentsialnyi istochnik razvitiya Zapadno-Sibirskogo regiona* [Zircon-ilmenite placer deposits as potential development source of the West Siberian region]. Tribunskii, E.N., Parovinchak, M.S., Eds., Kemerovo, OOO “Sars” Publ., 2001, 214 p. (in Russian)
 37. Cherepanskii, M.M. *Regional’nye gidrogeologicheskie prognozy vliyaniya otbora podzemnykh vod na rechnoi stok* [Regional hydrogeological forecasts of the effect of groundwater withdrawal on river flow]. Extended abstract Doctoral (Geol.-Min.) Diss. Moscow, NIA-Priroda, 2007, 49 p. (in Russian)
 38. Yankovich, E.P., Kopylova, Yu.G., Guseva, N.V. *Rasprostranennost’ geokhimicheskikh tipov podzemnykh vod Ob’-Tomskogo mezhdurech’ya* [The prevalence of geochemical types of groundwater in the Ob-Tomsk interfluve]. *Politematicheskii setevoi elektronnyi zhurnal Kubanskogo agrarnogo universiteta*. 2015, no. 107 (03). URL: <http://ej.kubargo.ru/2015/03/pdf/96.pdf>. (in Russian)
 39. Shvartsev, S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, is. 13, pp. 1285–1398.
 40. Shvartsev, S.L., Serebrennikova, O.V., Zdvizhkov, M.A., Savichev, O.G., Naimushina O.S. Geochemistry of wetland waters from the lower Tom basin, Southern Tomsk oblast. *Geochemistry International*, 2012, vol. 50, is. 4, pp. 367–380. DOI: 10.1134/S0016702912040076.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 550.422

ЕСТЕСТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ И ФОНОВОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ РАЙОНА ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС

© 2021 г. В. А. Ерзова^{1,*}, С. М. Судариков¹, В. Г. Румынин^{2,3}, А. А. Шварц^{2,3}

¹ Санкт-Петербургский горный университет, 21 Линия, 2, Санкт-Петербург, 199121 Россия

² Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Средний пр., 41, Санкт-Петербург, 199004 Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*E-mail: erzova.spmu@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.03.2021 г.

После доработки 09.03.2021 г.

Принята к публикации 09.03.2021 г.

На основании анализа данных мониторинга по радиационному составу подземных вод в районе расположения Ленинградской АЭС изучена естественная радиоактивность и фоновое содержание техногенных радионуклидов в них. Проанализированы радиационные показатели в четвертичном и ломоносовском водоносных горизонтах и вендском водоносном комплексе. Определяемыми естественными радионуклидами в подземных водах являются суммарная альфа (α)- и бета (β)- активности, радионуклиды: радон (^{222}Rn), радий (^{224}Ra , ^{226}Ra , ^{228}Ra), полоний (^{210}Po), свинец (^{210}Pb), торий (^{232}Th), калий (^{40}K), уран (^{238}U , ^{234}U). Отмечена повышенная радиоактивность естественных радионуклидов в подземных водах вендского комплекса. Даны характерные значения естественной радиоактивности в подземных водах исследуемой территории. Среди техногенных радионуклидов определялись содержания суммарная α - и β -активности, радионуклиды цезия (^{137}Cs), стронция (^{90}Sr), трития (^3H). Определены и представлены фоновые значения техногенных радионуклидов в подземных водах рассматриваемого района.

Ключевые слова: Ленинградская АЭС, мониторинг подземных вод, естественная радиоактивность, техногенные радионуклиды, фоновое содержание радионуклидов, загрязнение подземных вод

DOI: 10.31857/S0869780921040044

ВВЕДЕНИЕ

В земной коре содержится относительно небольшое количество природных радиогенных элементов, которые не имеют стабильных изотопов и являются радиоактивными. К ним относятся изотопы урана (^{238}U , ^{234}U), тория (^{232}Th) и радионуклиды, образованные в процессе их радиоактивного распада, — радий (^{224}Ra , ^{226}Ra , ^{228}Ra), радон (^{222}Rn), полоний (^{210}Po), свинец (^{210}Pb) и др. [16]. Также в земной коре содержатся долгоживущие радионуклиды, имеющие и стабильные изотопы. Среди них калий (^{40}K), рубидий (^{87}Rb) и радионуклиды космогенного происхождения — углерод (^{14}C), тритий (^3H) и др. [1, 23]. Суммарная активность элементов природного происхождения составляет около 10^{26} Бк, что примерно в 10 раз превышает активность техногенных радионуклидов [30].

Опасными для состояния здоровья населения являются техногенные радионуклиды, которые в отличие от природных, как правило, диспергированных в верхней части земной коры и не представляющих опасности, образуют радиотоксичные скопления. К источникам техногенных радионуклидов относятся испытания и разработка ядерного оружия, развитие атомной энергетики и ядерной медицины [3, 14, 26, 28, 29].

При работе атомных электростанций в штатном режиме в окружающую среду поступают, в основном, короткоживущие изотопы, в результате распада которых образуются более долгоживущие. К короткоживущим относятся изотопы ксенона, криптона и йода. Помимо упомянутых радионуклидов также образуются углерод (^{14}C) и тритий (^3H) [17, 19].

С выбросами и сбросами АЭС в окружающую среду могут поступать радионуклиды, образуя-

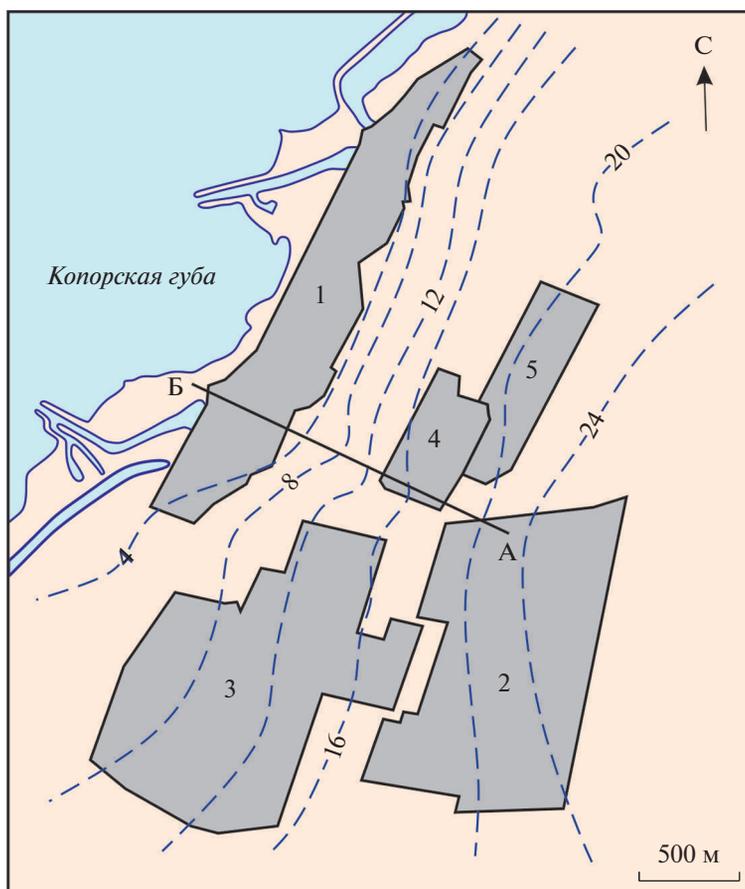


Рис. 1. Схема расположения объектов атомной энергетики Сосновоборского промышленного района, совмещенная с картой гидроизогипс грунтового водоносного горизонта (синие штриховые линии) на 2009 г. 1 – действующая АЭС (ЛАЭС); 2 – строящаяся АЭС (ЛАЭС-2); 3 – научно-исследовательский институт им. А.П. Александра (НИТИ); 4 – КПО ЛАЭС; 5 – предприятие по сбору, переработке и хранению радиоактивных отходов (СЗТО ФГУП “РосРАО”); АБ – линия гидрогеологического разреза (рис. 2).

щиеся при делении ядер урана (^{235}U) – изотопы цезия (^{137}Cs), стронция (^{90}Sr) и др. [18, 32, 33]. Техногенная радиоактивность подземных вод района расположения Ленинградской АЭС (ЛАЭС) характеризуется присутствием долгоживущих β - и γ -излучающих радионуклидов: цезий (^{137}Cs), стронций (^{90}Sr), тритий (^3H) [7, 15, 20].

Определение и оценка радиационного фона окружающей среды и, в частности, подземных вод, – важные задачи геолого-гидрогеологических работ на всех стадиях проектирования, строительства и эксплуатации объектов атомно-промышленного профиля.

Целью данного исследования является установление уровня радиоактивности и содержания природных и техногенных радионуклидов в подземных водах района расположения Ленинградской АЭС как основы для анализа данных мониторинга и прогноза воздействия радиационно-опасных объектов на подземные воды.

МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В Ленинградской области в промышленной зоне г. Сосновый Бор сосредоточены объекты атомной промышленности (рис. 1), где уже долгие годы осуществляется радиационный мониторинг подземных вод [12]. Контроль ведется службами радиационного мониторинга каждого предприятия. В подземных водах в основном определяют содержания суммарную α - и β -активности, ^3H , ^{137}Cs , ^{90}Sr .

Для дальнейшей оценки воздействия объектов “атомного” профиля на природную среду, в частности на подземные воды, и определения основных источников воздействия, в рамках настоящего исследования на основании данных мониторинга за период 2010–2015 гг. проведены:

- анализ содержания в подземных водах естественных (природных) радионуклидов;
- анализ содержания техногенных радионуклидов в подземных водах;

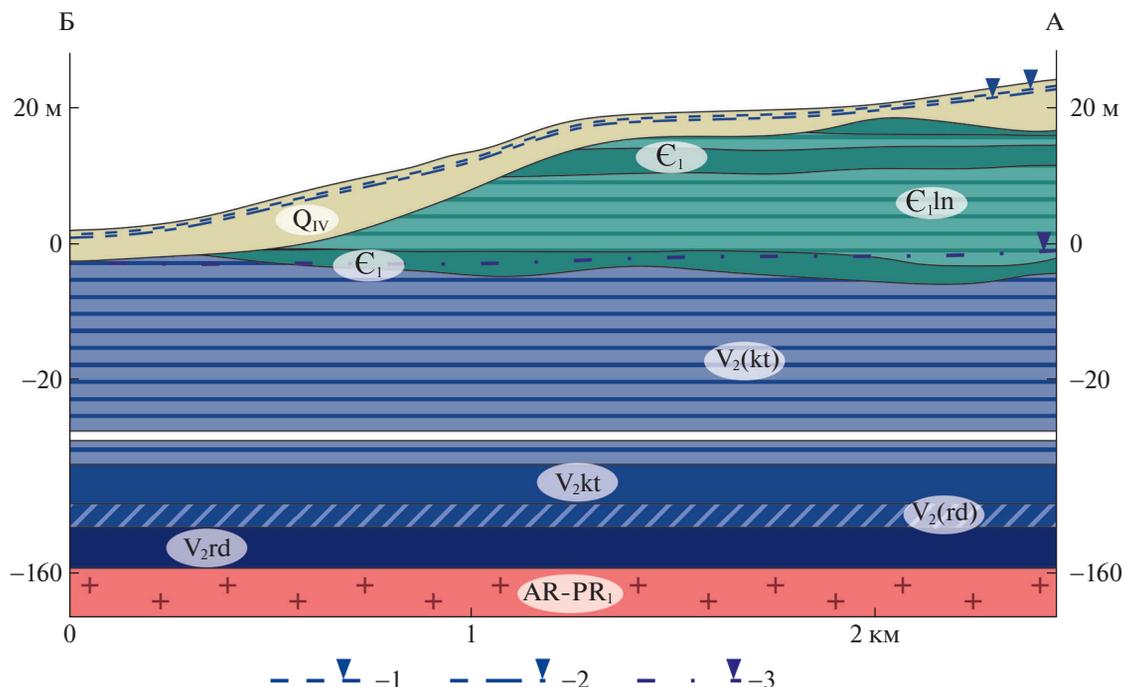


Рис. 2. Гидрогеологический разрез по линии АБ (см. рис. 1). Уровень воды в: 1 – четвертичном, 2 – ломоносовском, водоносных горизонтах, 3 – вендском водоносном комплексе.

– определение фоновых значений естественных и техногенных радионуклидов в подземных водах рассматриваемого района.

ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Геологический разрез на участке исследования представлен осадочными породами четвертичного, кембрийского и вендского возрастов, которые несогласно залегают на кристаллическом фундаменте [2, 8–11, 21, 31].

Один из основных природных объектов, содержащий естественные радионуклиды, – подземные воды. На исследуемой территории в осадочной толще выделяются подземные воды четвертичных и дочетвертичных отложений. Среди них можно выделить следующие водоносные горизонты: первыми от поверхности вскрываются – *четвертичный (Q_{IV}) и ломоносовский (E₁) водоносный горизонты*, далее под мощной толщей глин (до 80 м) залегают подземные воды *вендского водоносного комплекса (котлинский (V₂kt) и редкинский (V₂rd) водоносные горизонты)* (см. рис. 2).

Четвертичный (Q_{IV}) водоносный горизонт развит практически повсеместно. Водовмещающие породы представлены надморенными песками различного генезиса. Горизонт подстилается слабопроницаемыми прослоями суглинков мощностью до 8 м, являющимися локальными водоупо-

рамы. Мощность четвертичного водоносного горизонта на большей части исследуемой территории не превышает 5 м. Максимальные мощности приурочены к палеодолинам (до 25 м).

Основным источником питания подземных вод четвертичных отложений является инфильтрация. Разгружаются воды в Копорскую губу Финского залива (см. рис. 1).

Региональное направление потока западное и северо-западное с градиентом 0.005–0.015. На исследуемой территории наблюдается инверсия потока, обусловленная локальными, в основном техногенными факторами, такими как дренажные системы действующих и строящихся здесь объектов.

Уровень грунтовых вод на рассматриваемой территории устанавливается на отметках 0.5–1.5 м от поверхности земли. Наблюдается гидравлическая связь подземных вод четвертичных отложений с нижележащим ломоносовским водоносным горизонтом. Грунтовые воды питают нижележащий водоносный горизонт и, как следствие, загрязняют его.

Ломоносовский (нижнекембрийский) водоносный горизонт (E₁) сложен песками и слабосцементированными песчаниками. На рассматриваемой территории выделяют три водоносные зоны, разделенные глинистыми водоупорами. На территории ЛАЭС-2 распространены три водоносные зоны, на территории филиала ФГУП “РосРАО” –

две, а за территорией КПО ломоносовский водоносный горизонт выклинивается. Его суммарная мощность постепенно уменьшается к зоне выклинивания на запад с 8–10 м до 0 м.

Основные источники питания подземных вод нижнекембрийских отложений – инфильтрация и перетекания из четвертичного горизонта. Область разгрузки находится в районе склона II приморской террасы, где происходит перетекание в вышележащий горизонт четвертичных отложений, который в свою очередь разгружается в Копорскую губу Финского залива. Региональный поток направлен на запад и северо-запад с градиентом 0.005–0.01. На исследуемой территории ломоносовский водоносный горизонт дренируется глубоким врезом долины р. Воронка и строительным карьером на территории ЛАЭС-2.

Уровень воды в скважинах, оборудованных на ломоносовский водоносный горизонт, устанавливается на отметках 1–2.5 м от земной поверхности.

Помимо уровней, о хорошей гидравлической связи первых двух водоносных горизонтов свидетельствует их химический состав (воды гидрокарбонатные кальциевые).

Непосредственно на исследуемой территории подземные воды четвертичного и ломоносовского горизонтов для водоснабжения не используются. Практическое значение для питьевого водоснабжения они имеют на границе Предглинтовой низменности.

Вендский водоносный комплекс подразделяется на два водоносных горизонта *котлинский* (V_2kt) и *редкинский* (V_2rd), гидравлически связанные друг с другом. От вышележащего ломоносовского водоносного горизонта он отделен мощной пачкой водоупорных котлинских глин (до 80 м), залегает на глубине 90–120 м. В верхней части разреза вендский комплекс сложен алевритами и глинами, в нижней – песчаниками [5, 10, 25, 27]. Мощность комплекса достигает 80 м.

Область современного питания горизонта приурочена к Центрально-Карельской возвышенности, где вендские отложения залегают близко к поверхности и перекрыты только четвертичными отложениями. Областью разгрузки этого горизонта принято считать Финский залив.

Комплекс содержит напорные воды и широко используется для централизованного и частного водоснабжения Санкт-Петербурга и Ленинградской области [4, 13]. В результате интенсивной его эксплуатации к 1977 г. напор вендского водоносного комплекса был снижен на 60–70 м, что привело к образованию обширной депрессионной воронки. В этот период в районе г. Сосновый Бор поток сменил свое направление в сторону Санкт-Петербурга. Затем суммарный водоотбор из вендского водоносного комплекса в Санкт-

Петербурге и на Карельском перешейке стабилизировался, и началось постепенное восстановление уровней [6, 24, 31]. Направление движения подземных вод на участке исследований вернулось к естественному.

СОДЕРЖАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА

Радиологическое опробование подземных вод *четвертичного и ломоносовского водоносных горизонтов* на содержание в них естественных радионуклидов проводилось в пределах территории ЛАЭС-2. В рамках радиационного мониторинга в 2010–2015 гг. были опробованы 8 скважин, 7 из которых оборудованы на ломоносовский водоносный горизонт (пробурены в период 2007–2010 гг.), и 1 скважина – на четвертичный (пробурена в 2012 г.) (рис. 3).

Основные определяемые компоненты – суммарная α - и β -активности, радионуклиды: радон (^{222}Rn), радий (^{224}Ra , ^{226}Ra , ^{228}Ra), полоний (^{210}Po), свинец (^{210}Pb), торий (^{232}Th), калий (^{40}K), уран (^{238}U , ^{234}U). Анализируя полученные данные, стоит отметить, что величины концентраций радионуклидов практически не изменялись из года в год, поэтому были рассчитаны средние значения за период наблюдений (табл. 1).

Удельные активности природных радионуклидов в четвертичном и ломоносовском водоносных горизонтах за весь период наблюдений не превышают нормативных значений по НРБ-99/2009.

Радиологическое опробование подземных вод *вендского водоносного комплекса* выполнялось с 2011 по 2015 г. в 3 скважинах, введенных в эксплуатацию в этот период (см. рис. 3, табл. 2). Определено содержание тех же компонентов, что и в верхних горизонтах.

В период 2003–2010 гг. в районе г. Сосновый Бор были отобраны подземные воды на определение содержания в них природных радионуклидов (суммарная α - и β -активность, ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{40}K) (рис. 4, табл. 3).

Полученные результаты указывают на повышенную естественную радиоактивность, в том числе, повышенное содержание ^{228}Ra (среднее значение по скв. 6э/11 – 0.67 Бк/л, скв. 4/10 – 0.65 Бк/л), α -активности (до 3.87 Бк/л в скв. 6э/11 в 2011 г., скв. 8 – 1.44 Бк/л, скв. 9 – 2.2 Бк/л в 2010 г.), β -активности (до 3.18 Бк/л в скв. 6э/11 в 2011 г., скв. 8 – 4.05 Бк/л, скв. 9 – 3.05 Бк/л в 2010 г.). Указанные показатели превышают УВ по НРБ 99/09. Содержание ^{226}Ra превышает в 3–6 раз УВ по НРБ 99/09.

Сравнивая результаты опробования вендского водоносного комплекса в районе г. Сосновый Бор

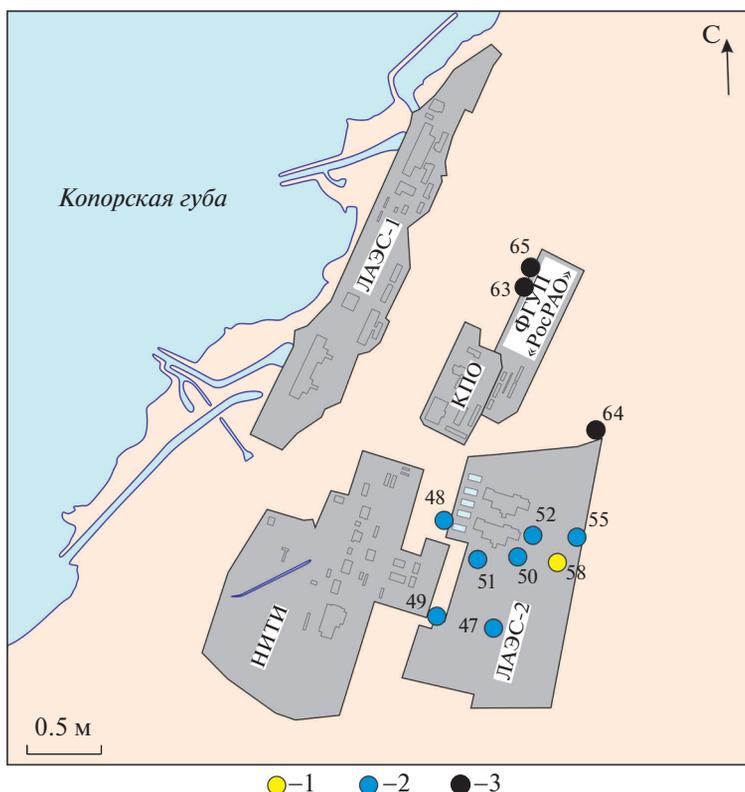


Рис. 3. Места отбора проб на содержание в подземных водах четвертичного, ломоносовского водоносных горизонтов и вендского водоносного комплекса природных радионуклидов в районе ЛАЭС. Скважины, пробуренные на 1 – четвертичный водоносный горизонт; 2 – ломоносовский водоносный горизонт; 3 – вендский водоносный комплекс.

и промышленном районе, где расположены предприятия атомной энергетики, стоит отметить, что содержания природных радионуклидов превышают УВ и имеют один порядок.

В табл. 4 приведены корреляционные связи между измеренными радиологическими показателями в солоноватых водах вендских отложений.

Из представленных результатов видно, что суммарная α -активность подземных вод вендского водоносного комплекса в большей степени представлена ^{226}Ra , суммарная β -активность ^{228}Ra . Концентрации в воде ^{226}Ra и его дочернего радионуклида ^{222}Rn имеют низкую степень связи друг с другом (коэффициент корреляции – 0.48). Относительно низкую взаимосвязь содержаний ^{226}Ra и ^{222}Rn можно объяснить принципиально различными механизмами их мобилизации подземными водами из породной матрицы. Оба покидают кристаллическую решетку материнских минералов за счет диффузии, однако для первого определяющими являются химические условия среды, а для второго – дисперсность твердого материала (породы и минералов). Для радия, находящегося в растворе, существенными оказываются механизмы сорбции–десорбции и соосажде-

ния с барием, в то время как радон совершенно нечувствителен к этим процессам.

Низкая связь ^{210}Pb и ^{210}Po является следствием наличия промежуточного изотопа ^{210}Bi и эффектом большей доступности заключительных членов цепочки распада для выщелачивания. Незначимый коэффициент корреляции $k = 0.05$ для пары $^{222}\text{Rn} - ^{210}\text{Pb}$ указывает на то, что свинец выщелачивается непосредственно из породы, а не является продуктом распада цепочки $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Pb} \rightarrow ^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb} \dots$ в воде.

Высокая связь концентраций изотопов ^{226}Ra и ^{228}Ra , несмотря на их отношение к разным радиоактивным рядам (^{238}U и ^{232}Th соответственно), показывает, что содержание радия в воде контролируется не только наличием в водовмещающих породах минералов материнских радионуклидов, но и химическим составом воды. При этом соотношение их удельных активностей является важным показателем соотношения ^{238}U и ^{232}Th в породе.

Полученные результаты показывают, что в верхних (четвертичном и ломоносовском) водоносных горизонтах содержание природных радионуклидов в разы ниже УВ_В. Отметим также, что

Таблица 1. Статистические данные по содержанию природных радионуклидов в верхних водоносных горизонтах в районе ЛАЭС (период наблюдений 2010–2014 гг.)

Радионуклид	Число определений	Среднее*, Бк/л	Мин.*, Бк/л	Макс.*, Бк/л	УВ _В ** по НРБ-99/2009, Бк/л [22]
$\Sigma\alpha$	27	<i>0.11</i>	0.032	0.28	0.2
$\Sigma\beta$	27	0.21	0.03	0.67	1
²²⁴ Ra	4	0.007	0.002	0.018	2.1
²²⁶ Ra	9	0.06	0.017	0.097	0.49
²²⁸ Ra	17	0.03	0.009	0.071	0.2
²¹⁰ Pb	17	0.01	0.002	0.06	0.2
²¹⁰ Po	9	0.004	0.002	0.01	0.11
²²² Rn	14	10.1	3	28	60
²³² Th	8	0.003	0.002	0.006	0.6
⁴⁰ K	9	0.18	0.04	0.59	
²³⁸ U	4	0.007	0.005	0.012	3
²³⁴ U	3	0.011	0.007	0.02	2.8

* – Среднее, медиана, максимальные и минимальные значения рассчитаны только по результатам определений со значениями выше детектируемой активности.

** УВ_В – Уровень вмешательства в питьевой воде.

Курсивом обозначен верхний предел измеренных значений, превышающих УВ_В.

Таблица 2. Статистические данные по содержанию природных радионуклидов в вендском водоносном комплексе в районе ЛАЭС (период наблюдений 2010–2015 гг.)

Радионуклид	Число определений	Среднее*, Бк/л	Мин.*, Бк/л	Макс.*, Бк/л	% превышений УВ _В	УВ _В ** по НРБ-99/2009, Бк/л [22]
$\Sigma\alpha$	11	<i>0.44</i>	0.07	1.84	63.64	0.2
$\Sigma\beta$	11	<i>0.89</i>	0.33	1.98	27.27	1.0
²²⁴ Ra	6	0.44	0.03	1.25	0	2.1
²²⁶ Ra	9	<i>0.24</i>	0.02	0.53	11.11	0.49
²²⁸ Ra	12	<i>0.34</i>	0.01	1.10	58.33	0.2
²¹⁰ Pb	11	0.01	0.002	0.01	0	0.2
²¹⁰ Po	9	0.01	0.002	0.02	0	0.11
²²² Rn	7	8.00	5.00	14.00	0	60
⁴⁰ K	8	0.7	0.35	1.34		

* – Среднее, максимальные и минимальные значения рассчитаны только по результатам определений со значениями выше детектируемой активности.

** УВ_В – Уровень вмешательства в питьевой воде.

Курсивом обозначен верхний предел измеренных значений, превышающих УВ_В.

это содержание ниже, чем в вендском водоносном комплексе. Высокие содержания природных радионуклидов в последнем могут связаны с тем, что подземные воды вендского комплекса в региональном плане характеризуются повышенной радиоактивностью. Она связана в первую очередь с минералами урана и тория, встречающимися как в кристаллических породах фундамента, так и непосредственно в вендских водовмещающих породах.

СОДЕРЖАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТАХ ИССЛЕДУЕМОГО РАЙОНА

Для того, чтобы корректно проинтерпретировать данные режимных радиационных наблюдений и проследить распространение полей загрязнения подземных вод, необходимо определить фоновые концентрации техногенных радионуклидов.

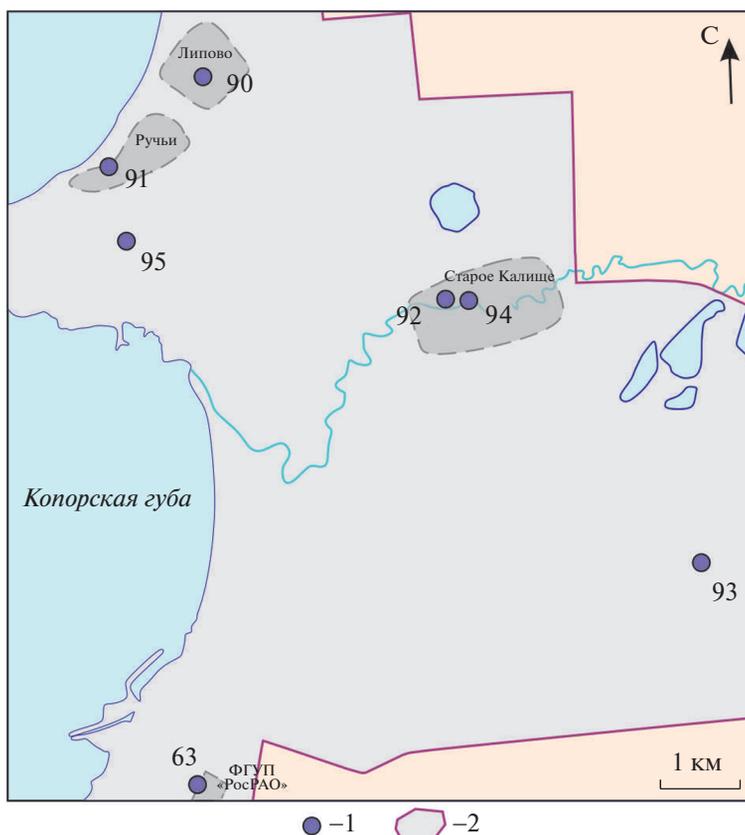


Рис. 4. Места отбора проб на содержание в подземных водах вендского водоносного комплекса природных радионуклидов в районе г. Сосновый Бор. 1 – скважины; 2 – границы г. Сосновый Бор.

Данные о фоновой радиоактивности (техногенной) подземных вод района Ленинградской АЭС крайне ограничены. До начала строительства объектов в районе г. Сосновый Бор в качестве ориентира принимались значения, полученные по речным водам и по единичным данным опробования подземных вод. Для ^{90}Sr и ^{137}Cs они не превышали единиц и первых десятков мБк/л [20].

Помимо содержания (активности) индивидуальных радионуклидов, определяемого радиохимическими или спектрометрическими методами, показателем радиоактивного загрязнения территории является определяемая радиометрически суммарная объемная β -активность подземных вод. Ее фоновые значения для территории Европейской части РФ составляют 1–4 Бк/л (без учета

Таблица 3. Статистические данные по содержанию природных радионуклидов в вендском водоносном комплексе в районе г. Сосновый Бор (период наблюдений 2003–2010 гг.)

Радионуклид	Число определений	Среднее*, Бк/л	Мин.*, Бк/л	Макс.*, Бк/л	% превышений УВ _В	УВ _В ** по НРБ-99/2009, Бк/л [22]
$\Sigma\alpha$	7	1.12	0.10	3.90	85.70	0.2
$\Sigma\beta$	7	2.58	0.95	4.80	71.40	1
^{226}Ra	4	2.53	1.40	3.10	100.00	0.49
^{222}Rn	1	9.30	9.30	9.30	0	60
^{40}K	1	1.40	1.40	1.40		

* – Среднее, максимальные и минимальные значения рассчитаны только по результатам определений со значениями выше детектируемой активности.

** – Уровень вмешательства в питьевой воде.

Курсивом обозначен верхний предел измеренных значений, превышающих УВ_В.

Таблица 4. Корреляционные связи между радиологическими характеристиками подземных вод вендских отложений

	$\Sigma\alpha$	$\Sigma\beta$	^{222}Rn	^{226}Ra	^{228}Ra	^{210}Pb	^{210}Po
$\Sigma\alpha$	1.00						
$\Sigma\beta$	0.76	1.00					
^{222}Rn	0.42	0.20	1.00				
^{226}Ra	0.94	0.76	0.48	1.00			
^{228}Ra	0.70	0.80	0.26	0.77	1.00		
^{210}Pb	-0.21	-0.21	0.05	-0.18	-0.28	1.00	
^{210}Po	0.06	-0.19	0.36	0.00	-0.12	0.14	1.00

активности трития), из которых 50–80% обусловлены активностью ^{40}K .

Для определения содержания техногенных радионуклидов в подземных водах изучаемого района в качестве объекта исследования выбрана площадка ЛАЭС-2 по причинам: 1) ЛАЭС-2 располагается выше по потоку относительно других объектов “атомного” профиля (см. рис. 1); 2) на момент исследования на площадке ЛАЭС-2 не было действующих объектов, следовательно, ее

можно считать неподверженной загрязнению по сравнению с площадками других объектов.

В период с 2010 по 2015 гг. на площадке ЛАЭС-2 и прилегающих территориях проводились исследования, которые позволили получить данные о величинах активности ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^3H , α - и β -активности (рис. 5). Нормативы качества (уровни вмешательства) подземных вод по радиационным показателям, согласно НРБ-99/2009 составляют для (Бк/л): ^3H –7600; ^{90}Sr – 4.9; ^{137}Cs – 11; α – 0.2; β – 1.

Радиологическое опробование подземных вод выполнялось в 18 скважинах, оборудованных на четвертичный, ломоносовский и вендский водоносный комплекс (табл. 5).

Из представленных данных видно, что в целом в подземных водах содержание техногенных радионуклидов не превышает допустимых значений.

Распределение всего массива определений радионуклидов по интервалам значений, соответствующим различной степени превышения природного фона (загрязнения) подземных вод (рис. 6) показывает, что по техногенным радионуклидам, формирующим основные поля загрязнения (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^3H), более 60% замеров находятся в пределах сотых и первых десятых долей, т.е. соот-

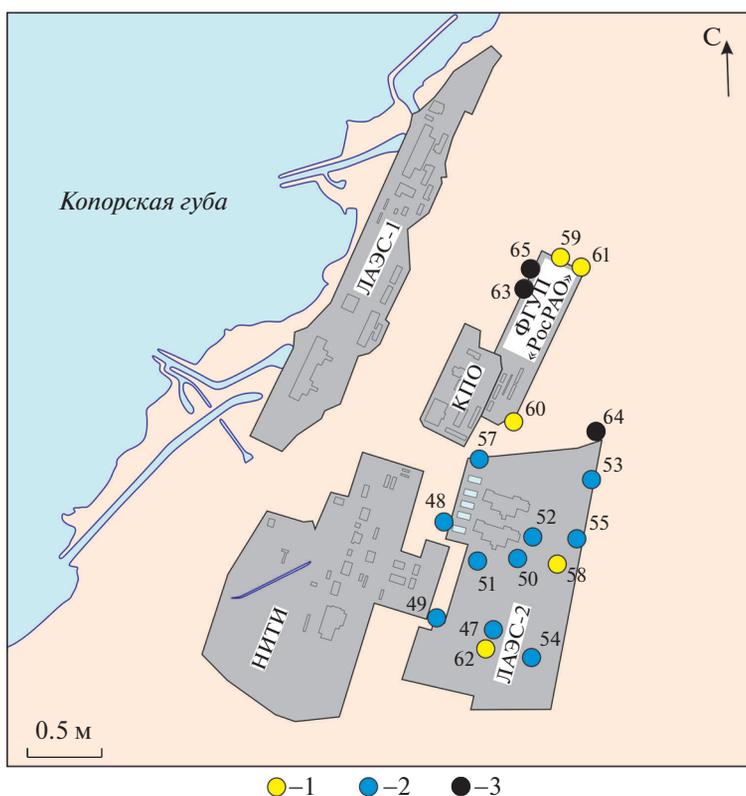


Рис. 5. Места отбора проб на содержание в подземных водах четвертичного, ломоносовского водоносных горизонтов и вендского водоносного комплекса техногенных радионуклидов в районе ЛАЭС. Скважины, пробуренные на: 1 – четвертичный водоносный горизонт; 2 – ломоносовский водоносный горизонт; 3 – вендский водоносный комплекс.

Таблица 5. Статистические данные по содержанию техногенных радионуклидов в подземных водах района ЛАЭС (период наблюдений 2010–2015 гг.)

Радионуклид	Число определений	Среднее*, Бк/л	Мин. *, Бк/л	Макс. *, Бк/л	УВ _В ** по НРБ-99/2009, Бк/л [22]
Четвертичный водоносный горизонт					
Σα	8	0.11	0.03	0.19	0.2
Σβ	8	0.21	0.1	0.45	1.0
¹³⁷ Cs	8	0.01	0.002	0.037	11
⁹⁰ Sr	7	0.02	0.0036	0.11	4.9
³ H	21	8.7	1.02	56	7600
Ломоносовский водоносный горизонт					
Σα	28	0.11	0.02	0.28	0.2
Σβ	28	0.22	0.03	0.67	1.0
¹³⁷ Cs	26	0.010	0.002	0.03	11
⁹⁰ Sr	29	0.009	0.001	0.027	4.9
³ H	39	6.2	0.18	99.7	7600
Вендский водоносный комплекс					
Σα	0.44	0.24	0.07	1.84	0.2
Σβ	0.89	0.83	0.33	1.98	1.0
¹³⁷ Cs	10	0.016	0.005	0.05	11
⁹⁰ Sr	11	0.030	0.004	0.16	4.9
³ H	13	71.5	0.07	870	7600

* – Среднее, максимальные и минимальные значения рассчитаны только по результатам определений со значениями выше детектируемой активности.

** УВ_В – Уровень вмешательства в питьевой воде.

Курсивом обозначен верхний предел измеренных значений, превышающих УВ_В.

ветствуют фоновым концентрациям, а около 20% превышают их.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрен один из природных объектов, содержащий как естественные, так и техногенные радионуклиды, – подземные воды. В пределах исследуемой территории были определены содержания радионуклидов в подземных водах четвертичного, ломоносовского водоносных горизонтов и вендского водоносного комплекса.

Согласно полученным результатам, основными естественными радионуклидами, содержащимися в подземных водах изучаемой территории, являются радон (²²²Rn), радий (²²⁴Ra, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra), полоний (²¹⁰Po), свинец (²¹⁰Pb), торий (²³²Th), калий (⁴⁰K), уран (²³⁸U, ²³⁴U).

В вендском водоносном комплексе как в пределах г. Сосновый Бор, так и в районе Ленинградской АЭС содержание естественных радионуклидов превышает УВ и в 2–10 раз выше, чем в

верхних горизонтах. В подземных водах четвертичного и ломоносовского горизонтов УВ по содержанию естественных радионуклидов не превышены.

Стоит отметить, что подземные воды первых от поверхности водоносных горизонтов в районе исследований не используются для водоснабжения. Наличие в кровле вендского водоносного комплекса регионально выдержанной мощной глинистой толщи характеризует его как изолированный в разрезе и свидетельствует о его защищенности от загрязнения. Подземные воды вендского комплекса могут быть использованы для водоснабжения только после водоподготовки.

Исходя из представленных результатов, можно заключить, что для подземных вод рассматриваемого района характерна естественная радиоактивность:

– в четвертичном и ломоносовском водоносных горизонтах по радию (²²⁴Ra < 0.01 Бк/л, ²²⁶Ra < 0.1 Бк/л, ²²⁸Ra < 0.3 Бк/л), свинцу (²¹⁰Pb < 0.01 Бк/л), полонию (²¹⁰Po < 0.04 Бк/л), радону

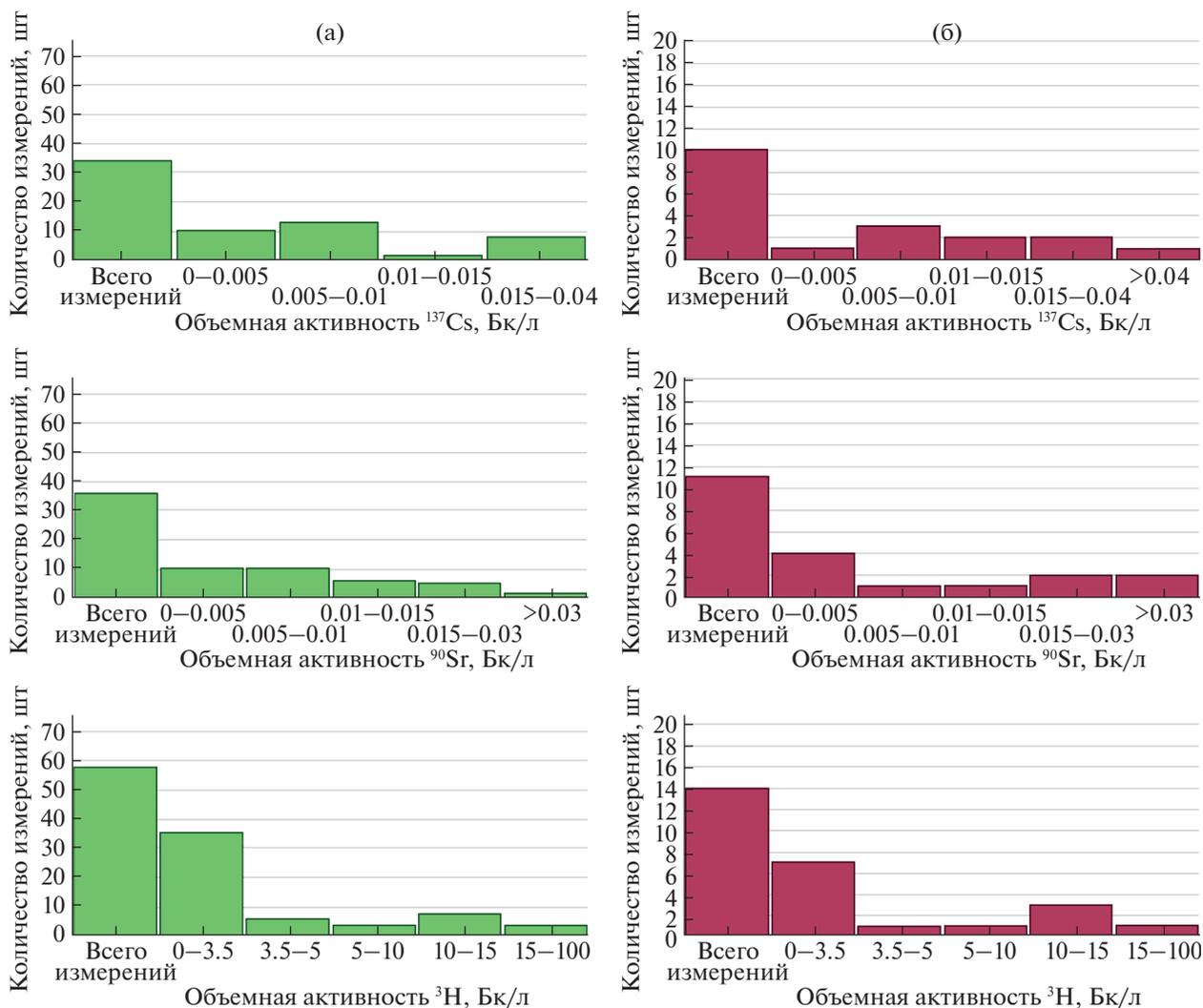


Рис. 6. Гистограммы распределения содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^3H в подземных водах по результатам опробования 2010–2015 гг. на территории площадки ЛАЭС-2 и смежных территориях: (а) – четвертичный и ломоносовский водоносные горизонты; (б) – гдовский водоносный горизонт.

($^{222}\text{Rn} < 10$ Бк/л), торию ($^{232}\text{Th} < 0.03$ Бк/л), калию ($^{40}\text{K} < 0.2$ Бк/л), урану ($^{238}\text{U} < 0.07$ Бк/л, $^{234}\text{U} < 0.01$ Бк/л);

– в вендском водоносном комплексе по радию ($^{224}\text{Ra} < 1.3$ Бк/л, $^{226}\text{Ra} = 0.02–3.1$ Бк/л, $^{228}\text{Ra} = 0.01–1.1$ Бк/л), свинцу ($^{210}\text{Pb} < 0.01$ Бк/л), полонию ($^{210}\text{Po} < 0.02$ Бк/л), радону ($^{222}\text{Rn} = 5–14$ Бк/л), калию ($^{40}\text{K} = 0.35–1.4$ Бк/л).

Техногенная радиоактивность подземных вод представлена радионуклидами ^3H , ^{90}Sr , ^{137}Cs . В целом их значения на рассматриваемой территории не превышают УВ. Таким образом, в районе расположения Ленинградской АЭС для техногенных радионуклидов характерны следующие фоновые значения: $^3\text{H} = 1.0–4.0$ Бк/л; $^{90}\text{Sr} = 0.004–0.030$ Бк/л; $^{137}\text{Cs} = 0.003–0.040$ Бк/л. Фон по β -активности, на основании вышеизложенного, при-

нимается равным $0.03–1.0$ Бк/л, α -активности – $0.02–0.2$ Бк/л.

Согласно полученным результатам, средние значения ^{137}Cs и ^{90}Sr на территории ЛАЭС-2 в целом лежат в пределах фоновых значений. Средняя объемная активность ^3H не превышает 3.5 Бк/л в 60% исследуемых скважин, и в 16% скважин – 10 Бк/л. При этом высокие значения обусловлены единичными замерами, которые в дальнейшем вернулись на уровень фоновых значений. Таким образом, территорию площадки ЛАЭС-2 следует рассматривать в качестве “фоновой”.

Полученные результаты будут положены в основу дальнейших исследований с целью оценки воздействия объектов “атомного” профиля на загрязнение подземных вод и определения основ-

ных источников воздействия в районе Ленинградской АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов А.А., Бадун Г.А.* Основы радиохимии и радиоэкологии: уч. пособие. Баку: Филиал Химического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. 138 с.
2. *Андерсон Е.Б., Савоненков В.Г., Шабалев С.И.* Перспективы создания подземных могильников РАО в нижнекембрийских глинах Ленинградской области // Тр. Радиового института им. В.Г. Хлопина. 2006. Т. XI. С. 105–132.
3. *Артамонова С.Ю.* Техногенные радионуклиды в природных водах районов мирных подземных ядерных взрывов “Кратон-3” и “Кратон-4” // Геоэкология. 2013. № 5. С. 417–428.
4. *Виноград Н.А., Токарев И.В., Строганова Т.А.* Особенности формирования подземных вод основных эксплуатируемых водоносных горизонтов Санкт-Петербурга и окрестностей по данным о химическом и изотопном составе // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Т. 64. № 4. С. 575–597.
5. *Воронов А.Н., Виноград Н.А.* Гдовский водоносный комплекс – источник пресных, минеральных и промышленных вод // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология. География. 2006. № 4. С. 88–95.
6. *Воронюк Г.Ю., Бородулина Г.С., Крайнюкова И.А., Токарев И.В.* Водообмен в краевых частях балтийского щита и прилегающих артезианских бассейнах по изотопным и химическим данным (научные и прикладные аспекты). Карельский перешеек // Тр. Карельского научного центра Российской академии наук, 2016. № 9. С. 46–56.
7. *Григорьев А.Г., Владимиров М.В.* Основные закономерности распределения главных природных и техногенных радионуклидов в донных осадках акватории восточной части Финского залива // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2010. № 4–2. С. 57–61.
8. *Дашко Р.Э., Коробко А.А.* Инженерно-геологическое обоснование безопасности строительства и эксплуатации сооружений различного назначения в пределах Предглинтовой низменности (Западная часть Ленинградской области) // Записки Горного института. 2016. Т. 206. С. 22–25.
9. *Дашко Р.Э., Коробко А.А.* Генетические особенности формирования и изменения физико-химических свойств нижнекембрийских глин в разрезе Санкт-Петербургского региона // Сергеевские чтения. Матер. годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 16. М.: РУДН, 2014. С. 23–29.
10. *Дашко Р.Э., Котюков П.В.* Инженерно-геологический и гидрогеологический анализ особенностей эксплуатации перегонных тоннелей петербургского метрополитена в водоупорной толще вендского водоносного комплекса // Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций. Вып. 17. М.: РУДН, 2015. С. 343–349.
11. *Дашко Р.Э., Котюков П.В., Шидловская А.В.* Влияние гидрогеологических условий на безопасность освоения подземного пространства при строительстве транспортных тоннелей // Записки Горного института. 2012. Вып. 199. С. 9–16.
12. *Ерзова В.А., Владимиров К.В., Румынин В.Г.* Исследование поведения техногенных радиоактивных ореолов на участке исторического загрязнения подземных вод по данным мониторинга // Сб. тр. конференции “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации”. М.: Геомаркетинг, 2019. С. 388–398.
13. *Кармазинов Ф.В.* Водоснабжение Санкт-Петербурга. СПб.: Новый журнал. 2003. 670 с.
14. *Кудельский А.В., Смит Дж.Т., Пашкевич В.И.* Постчернобыльская гидросфера Беларуси в районах радиоактивных выпадений (ретроспективный обзор) // Геоэкология. 2012. № 4. С. 293–309.
15. *Кулькова М.А., Лебедев С.В., Нестеров Е.М., Давыдочкина А.В.* Радиоуглерод и тритий в водоносной системе Санкт-петербургского региона // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. 2014. № 165. С. 93–98.
16. *Куриленко В.В., Хайкович И.М., Лебедев С.В.* Геофизические поля в экологической геологии // Вестник СПбГУ. 2016. № 1. С. 15–28.
17. *Назаров Е.И., Екидин А.А., Васильев А.В.* Оценка поступления углерода-14 в атмосферу, обусловленного выбросами АЭС // Известия высших учебных заведений. 2018. Т. 61. № 12/2. С. 67–73.
18. *Огородников Б.И.* Техногенные радиоактивные аэрозоли – продукты аварии Чернобыльской АЭС // Безопасность труда в промышленности. 2011. № 4. С. 42–48.
19. *Пышкина М.Д.* Определение основных дозообразующих нуклидов в выбросах АЭС РВР и ВВЭР // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2017. № 2 (18). С. 98–107.
20. *Румынин В.Г., Панкина Е.Б., Якушев М.Ф., Боронина А.В. и др.* Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты (г. Сосновый Бор Ленинградской области). СПб.: Изд-во СПбУ, 2002. 249 с.
21. *Румынин В.Г., Никуленков А.М.* Зональность физических свойств котлинских глин вендской системы (северо-запад русской платформы) // Записки Горного института, 2012. Т. 197. С. 191–196.
22. СанПиН 2.6.1. 2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). М.: Госстандарт, 2009. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902170553>
23. *Стамат И.П., Лисаченко Э.П.* Эффективная удельная активность природных радионуклидов в средах с нарушенным радиоактивным равновесием в рядах урана и тория // Радиационная гигиена. 2008. Т. 1. № 1. С. 27–31.
24. *Шварц А.А.* Химический состав подземных вод Санкт-Петербургского региона в свете новых требований к качеству питьевой воды // Вестник СПбУ. Сер. 7. 2005. Вып. 1. С. 85–93.

25. Яхнин Э.Я., Томилин А.М., Шелемотов А.С. Оценка качества и химический состав подземных вод дочеревитчных отложений Ленинградской области // Разведка и охрана недр. 2005. № 5. С. 42–48.
26. Aquilina L., Matray J.M., Lancelot J. 25 years after the Chernobyl power plant explosion: Management of nuclear wastes and radionuclide transfer in the environment // Applied Geochemistry, 2012, vol. 27 (7), pp. 1291–1296.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.04.010>
27. Dashko R.E., Lebedeva Y.A. Improving approaches to estimating hydrogeological investigations as a part of engineering survey in megacities: case study of St. Petersburg // Water resources, 2017, vol. 44, no.7, pp. 875–885.
<https://doi.org/10.1134/S009780781707003X>
28. Gallardo A.H., Marui A. The aftermath of the Fukushima nuclear accident: Measures to contain groundwater contamination // Science of The Total Environment, 2016, vol. 547, pp. 261–268.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.129>
29. Ho Song J. An assessment on the environmental contamination caused by the Fukushima accident // Journal of Environmental Management, 2018, vol. 206, pp. 846–852.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.068>
30. Poinssot C., Geckeis H. Overview of Radionuclide Behavior in the Natural Environment. Radionuclide Behavior in the Natural Environment // Woodhead Publishing Limited, 2012, pp. 1–12.
31. Protosenya A.G., Lebedev M.O., Karasev M.A., Belyakov N.A. Geomechanics of low-subsidence construction during the development of underground space in large cities and megalopolises // Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 2019, vol. 9, no 5, pp. 1005-1014.
<https://doi.org/10.24247/ijmperdoct201989>
32. Russell B.C., Croudace Ian W., Warwick Phil E. Determination of ¹³⁵Cs and ¹³⁷Cs in environmental samples: A review // Analytica Chimica Acta, 2015, vol. 890, pp. 7–20.
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.06.037>
33. Tondel M., Granath G., Wälinder R. ¹³⁷Cs activity in Sweden after the Chernobyl Nuclear Power Plant accident in relation to quaternary geology and land use // Applied Geochemistry, 2017, vol. 87, pp. 38–43.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.10.012>

NATURAL RADIOACTIVITY AND BACKGROUND VALUES OF ANTHROPOGENIC RADIONUCLIDES IN GROUNDWATER AROUND THE LENINGRAD NPP AREA

V. A. Erzova^{a, #}, S. M. Sudarikov^a, V. G. Rumynin^{b, c}, and A. A. Shvarts^{b, c}

^a St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, 21st Line V.O., 2, 199106, Russia

^b St. Petersburg Division, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences; Srednii pr. 41, St. Petersburg, 199004 Russia

^c Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7–9, St. Petersburg, 199004 Russia

[#]E-mail: erzova.spmu@yandex.ru

The natural radioactivity and background content of anthropogenic radionuclides in groundwater near the Leningrad NPP was studied based on the results of monitoring observations. Radiation characteristics of the Quaternary, Lomonosov, and Vendian aquifer complexes were analyzed. The total alpha (α)- and beta (β) activities, as well as the content of radon (²²²Rn), radium (²²⁴Ra, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra), polonium (²¹⁰Po), lead (²¹⁰Pb), thorium (²³²Th), potassium (40K), and uranium (²³⁸U, ²³⁴U) were measured. The increased activity of natural radionuclides in the the Vendian aquifer was noted. A typical level of natural radioactivity was estimated for the groundwater in the study area. The total alpha (α)- and beta (β) activities, the content of cesium (¹³⁷Cs), strontium (⁹⁰Sr), tritium (³H) were measured among the anthropogenic radionuclides. The background levels of anthropogenic radionuclides in groundwater in the study area were measured and provided.

Keywords: Leningrad NPP, groundwater monitoring, natural radioactivity, anthropogenic radionuclides, background values of radionuclides, groundwater pollution

REFERENCES

1. Abramov, A.A., Badun, G.A. *Osnovy radiokhimii i radioekologii: ucheb. posobie* [Fundamentals of radiochemistry and radioecology: textbook]. Baku, Branch of the Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, 2011, 138 p. (in Russian)
2. Anderson, E.B., Savonenkov, V.G., Shabalev, S.I. *Perspektivy sozdaniya podzemnykh mogil'nikov RAO v nizhnekembriiskikh glinakh Leningradskoi oblasti* [Prospects for the creation of underground repositories for radioactive waste in the Lower Cambrian clays of the Leningrad region]. Proceedings of the Khlopin Radium Institute, 2006, vol. XI, pp. 105–132. (in Russian)
3. Artamonova, S.Yu. *Tekhnogennnye radionuklidy v prirodnykh vodakh raionov mirnykh podzemnykh yadernykh vzyrovov "Kraton-3" i "Kraton-4"* [Technogenic radionuclides in natural water in the areas of peaceful

- underground nuclear explosions “Craton-3” and “Craton-4”]. *Geoekologiya*, 2013, no. 5, pp. 417–428. (in Russian)
4. Vinograd, N.A., Tokarev, I.V., Stroganova, T.A. *Osobennosti formirovaniya podzemnykh vod osnovnykh ekspluatiruemykh vodonosnykh gorizontov Sankt-Peterburga i okrestnosti po dannym o khimicheskom i izotopnom sostave* [Specific features of groundwater formation in the main aquifers of St. Petersburg and suburbs based on data of chemical and isotope composition]. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle*, 2019, vol. 64, no. 4, pp. 575–597. (in Russian)
 5. Voronov, A.N., Vinograd, N.A. *Gdovskii vodonosnyi kompleks – istochnik presnykh, mineral'nykh promyshlennykh vod* [Lower-kotline aquifer as a source of potable water supply and mineral industrial waters]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 7. Geologiya. Geografiya*. 2006, no. 4, pp. 88–95. (in Russian)
 6. Vroniuk, G.Yu., Borodulina, G.S., Krainyukova, I.A., Tokarev, I.V. *Vodoobmen v kraevykh chastyakh Baltiiskogo shchita i prilegayushchikh artezijskikh basseynakh po izotopnym i khimicheskim dannym (nauchnye i prikladnye aspekty). Karel'skii peresheek* [Groundwater exchange in the Baltic shield marginal areas and adjacent artesian basins based on isotope and hydrochemistry data. Scientific problems and practical applications. Karelian isthmus]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2016, no. 9, pp.46–56. (in Russian)
 7. Grigoriev, A.G., Vladimirov, M.V. *Osnovnye zakonomernosti raspredeleniya glavnykh prirodnykh i tekhnogennykh radionuklidov v donnykh osadkakh akvatorii vostochnoi chasti Finskogo zaliva* [Main tendencies in distribution of major natural and technogenic radionuclides in the bottom sediments in the eastern part of the Gulf of Finland]. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychainykh situatsiyakh* [Medical biological and socio-psychological safety problems in emergencies], 2010, no. 4–2, pp. 57–61. (in Russian)
 8. Dashko, R.E., Korobko, A.A. *Inzhenerno-geologicheskoe obosnovanie bezopasnosti stroitel'stva i ekspluatatsii sooruzhenii razlichnogo naznacheniya v predelakh Predglintovoi nizmennosti (Zapadnaya chast' Leningradskoi oblasti)* [Engineering geological substantiation of safety upon construction and operation of engineering structures of different purpose within the Predglintovaya Lowland (the Western part of the Leningrad region)]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2016, vol. 206, pp. 22–25. (in Russian)
 9. Dashko, R.E., Korobko, A.A. *Geneticheskie osobennosti formirovaniya i izmeneniya fiziko-khimicheskikh svoystv nizhnemkambriiskikh glin v razreze Sankt-Peterburgskogo regiona* [Genetic features of the formation and changes in the physicochemical properties of the Lower Cambrian clays in the section of the St. Petersburg region]. *Sergeevskie chteniya. Materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii* [Sergeev's readings. Proc. annual session of the Sci. Council RAS on the problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology]. 2014, vol. 16, pp. 23–29. (in Russian)
 10. Dashko, R.E., Kotyukov, P.V. *Inzhenerno-geologicheskii i gidrogeologicheskii analiz osobennosti ekspluatatsii peregonnykh tonnelei peterburgskogo metropolitena v vodoupornoi tolshche vendskogo vodonosnogo kompleksa* [Engineering geological and hydrogeological analysis of the specific features in the operation of the St. Petersburg metro running tunnels in the water-resistant strata of the Vendian aquifer complex]. *Sergeevskie chteniya. Inzhenerno-geologicheskii i geoekologicheskii problemy gorodskikh aglomeratsii* [Sergeev's readings. Engineering geological and geoeological problems of urban agglomerations]. 2015, vol. 17, pp. 343–349. (in Russian)
 11. Dashko, R.E., Kotyukov, P.V., Shidlovskaya, A.V. *Vliyaniye gidrogeologicheskikh uslovii na bezopasnost' osvoeniya podzemnogo prostranstva pri stroitel'stve transportnykh tonnelei* [Influence of hydrogeological conditions on the subsurface development safety upon the construction of transport tunnels]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2012, vol. 199, pp. 9–16. (in Russian)
 12. Erzova, V.A., Vladimirov, K.V., Rumynin, V.G. *Issledovanie povedeniya tekhnogennykh radioaktivnykh oreolov na uchastke istoricheskogo zagryazneniya podzemnykh vod po dannym monitoringa* [Investigation of technogenic radioactive halos behavior in the area of historical groundwater contamination according to monitoring data]. *Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiiskoi Federatsii*, 2019, pp. 388–398. (in Russian)
 13. Karmazinov, F.V. *Vodosnabzhenie Sankt-Peterburga* [Water supply in St. Petersburg]. *St. Petersburg. Novyi zhurnal*, 2003, pp. 670. (in Russian)
 14. Kudelskii, A.V., Smith, J.T., Pashkevich, V.I. *Postchernobyl'skaya gidrosfera Belarusi v raionakh radioaktivnykh vypadenii (retrospektivnyi obzor)* [Post-Chernobyl hydrosphere of Belarus within the radioactively contaminated territories (retrospective review)]. *Geoekologiya*, 2012, no. 4, pp. 293–309. (in Russian)
 15. Kul'kova, M.A., Lebedev, S.V., Nesterov, E.M., Davydochkina, A.V. *Radiouglerod i tritii v vodonosnoi sisteme Sankt-Peterburgskogo regiona* [Radiocarbon and tritium in the hydrosphere of St. Petersburg region]. *Izvestiya RGPU im A.I.Gertsena*, 2014, no. 165, pp. 93–98. (in Russian)
 16. Kurilenko, V.V., Khaikovich, I.M., Lebedev, S.V. *Geofizicheskie polya v ekologicheskoi geologii* [Geophysical fields in environmental geology]. *Vestnik SPbGU*, 2016, no. 1, pp. 15–28. (in Russian)
 17. Nazarov, E.I., Ekidin, A.A., Vasil'ev, A.V. *Otsenka postupleniya ugleroda-14 v atmosferu, obuslovlennogo vybrosami AES* [Assessment of the atmospheric carbon-14 caused by NPP emissions]. *Izvestiya vuzov*, 2018, vol. 61, no.12/2, pp. 67–73. (in Russian)
 18. Ogorodnikov, B.I. *Tekhnogennye radioaktivnye aerizoly – produkty avarii Chernobyl'skoi AES* [Technogenic radioactive aerosols as the products of Chernobyl NPP accident]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2011, no. 4, pp. 42–48. (in Russian)
 19. Pyshkina, M.D. *Opreделение osnovnykh dozoobrazuyushchikh nuklidov v vybrosakh AES PWR i VVER* [Determination of the main dose-forming nuclides in NPP PWR and VVER releases]. *Biosfernaya sovместimost'*:

- chelovek, region, tekhnologii*, 2017, no. 2 (18), pp. 98–107. (in Russian)
20. Rumynin, V.G., Pankina, E.B., Yakushev, M.F., Boronina, A.V. et al. *Otsenka vliyaniya atomno-promyshlennogo kompleksa na podzemnye vody i smezhnye prirodnye ob'ekty (g. Sosnovyi Bor Leningradskoi oblasti)* [Assessment of the atomic-industrial complex influence on the groundwater and adjacent natural bodies (Sosnovyi Bor, Leningrad oblast)]. St. Petersburg, SPbU Publ., 2002, 249 p. (in Russian)
 21. Rumynin, V.G., Nikulenkov A.M. *Zonal'nost' fizicheskikh svoystv kotlinskikh glin vendskoi sistemy (severozapad Russkoi platformy)* [Zoning of physical properties of the Kotlin clays of the Vendian system (northwest of the Russian platform)]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2012, vol. 197, pp. 191–196. (in Russian)
 22. SanPiN 2.6.1. 2523–09. *Normy radiatsionnoi bezopasnosti (NRB-99/2009)* [Radiation safety standards (NRB-99/2009)]. Moscow, Gosstandart Publ., 2009. (in Russian)
 23. Stamat, I.P., Lisachenko, E.P. *Effektivnaya udel'naya aktivnost' prirodnikh radionuklidov v sredakh s narushennym radioaktivnym ravновесием v ryadakh urana i toriya* [Effective specific activity of natural radionuclides for the norm belonged to ²³⁸U and ²³²Th series being in the state of disturbed radioactive equilibrium]. *Radiatsionnaya gigiena*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 27–31. (in Russian)
 24. Shvarts, A.A. *Khimicheskii sostav podzemnykh vod Sankt-Peterburgskogo regiona v svete novykh trebovaniy k kachestvu pit'evoi vody* [Chemical composition of groundwater in the area of St. Petersburg in view of new requirements to the potable water quality]. *Vestnik SPbGU*, 2005, vol. 1, pp. 85–93. (in Russian)
 25. Yakhnin, E.Ya., Tomilin, A.M., Shelemotov, A.S. *Otsenka kachestva i khimicheskii sostav podzemnykh vod dochetvertichnykh otlozhenii Leningradskoi oblasti* [Assessment of the quality and chemical composition of groundwater in pre-Quaternary sediments of the Leningrad region]. *Razvedka i okhrana neдр*, 2005, no. 5, pp. 42–48. (in Russian)
 26. Aquilina, L., Matray, J.M., Lancelot, J. 25 years after the Chernobyl power plant explosion: management of nuclear wastes and radionuclide transfer in the environment. *Applied Geochemistry*, 2012, vol. 27 (7), pp. 1291–1296.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.04.010>.
 27. Dashko, R.E., Lebedeva, Y.A. Improving approaches to estimating hydrogeological investigations as a part of engineering survey in megacities: case study of St. Petersburg. *Water resources*, 2017, vol. 44, no.7, pp. 875–885.
<https://doi.org/10.1134/S009780781707003X>
 28. Gallardo, A. H., Marui, A. The aftermath of the Fukushima nuclear accident: Measures to contain groundwater contamination. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 547, pp. 261–268.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.129>.
 29. Ho, Song J. An assessment on the environmental contamination caused by the Fukushima accident. *Journal of Environmental Management*, 2018, vol. 206, pp. 846–852.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.068>.
 30. Poinssot, C., Geckeis, H. Overview of radionuclide behavior in the natural environment. In: *Radionuclide behavior in the natural environment*. Woodhead Publ. Ltd, 2012, pp. 1–12.
 31. Protosenya, A.G., Lebedev, M.O., Karasev, M.A., Belyakov, N.A. Geomechanics of low-subsidence construction during the development of underground space in large cities and megalopolices. *Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2019, vol. 9, no. 5, pp. 1005–1014.
<https://doi.org/10.24247/ijmperdoct201989>
 32. Russell, B.C., Croudace, Ian W., Warwick, Phil E. Determination of ¹³⁵Cs and ¹³⁷Cs in environmental samples: A review. *Analytica Chimica Acta*, 2015, vol. 890, pp. 7–20.
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.06.037>.
 33. Tondel, M., Granath, G., Wälinder, R. ¹³⁷Cs activity in Sweden after the Chernobyl Nuclear Power Plant accident in relation to Quaternary geology and land use. *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 87, pp. 38–43.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.10.012>.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 55.50455.553.9

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА КОТОВСКОГО РАЙОНА ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЛЕВОБЕРЕЖЬЯ р. МЕДВЕДИЦА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

© 2021 г. К. Д. Светашова^{1,2,*}, М. А. Харькина^{1,**}, Н. С. Грохольский^{2,3,***}

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

² ФГБУ “Гидроспецгеология”, ул. Маршала Рыбалко, д. 4, Москва, 123060 Россия

³ Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,
ул. Миклухо-Маклая, д. 23, Москва, 117997 Россия

* E-mail: info@specgeo.ru

** E-mail: info@rector.msu.ru

*** E-mail: office@mgri.ru

Поступила в редакцию 10.03.2021 г.

После доработки 03.05.2021 г.

Принята к публикации 23.05.2021 г.

Приведены сведения об эколого-геохимической обстановке Доно-Медведицкой гряды Приволжской возвышенности, приведена информация о техногенной нагрузке. Установлено, что основными источниками техногенного воздействия являются производственные комплексы, связанные с открытыми разработками железной руды и нефтепромыслы. На основе результатов спектрального анализа выявлено два основных загрязняющих химических элемента, распространенных в почве, донных отложениях и поверхностных водах: свинец (Pb), кадмий (Cd). Дана оценка состояния наземных экосистем, включая абиотическую (почвы, поверхностные воды и донные отложения) и биотическую (растительные остатки пшеницы) части. На базе сопряженного учета состояния литосферы и фитоценозов с использованием традиционных геологических и биотических критериев составлена среднemasштабная карта эколого-геохимического районирования левобережья р. Медведица. Целью работы является оценка и выявление трансформации эколого-геохимических условий под влиянием различных техногенных факторов на территории Доно-Медведицкой гряды Приволжской возвышенности.

Ключевые слова: эколого-геологические условия, почвы, донные отложения, воды, растительность, карьеры, нефтепромыслы

DOI: 10.31857/S086978092104010X

ВВЕДЕНИЕ

Исследование эколого-геохимических условий Доно-Медведицкой гряды Приволжской возвышенности и состояния наземных экосистем левобережья р. Медведица (Котовский район Волгоградской обл.) актуально в связи с интенсивной техногенной нагрузкой на территорию. Эколого-геохимические условия определяются влиянием геохимических неоднородностей верхней части литосферы на состояние почв, донных отложений, поверхностных вод, а также всего живого, в частности растительности. Трансформация эколого-геохимических условий происходит при функционировании горнодобывающих, промышленных, транспортных и сельскохозяйственных комплексов.

На горнодобывающих территориях одним из основных источников техногенной нагрузки являются месторождения нефти и газа, на базе которых существует нефтегазоносный промысел¹. Наиболее крупным является Коробковское нефтегазодобывающее управление (НГДУ), расположенное в центральной части обследованной территории. При разработке месторождений воздействие на природную среду оказывают буровые растворы, шламохранилища, утечки пластовой продукции из нефтепроводов и водопроводов

¹ Нефтегазодобывающее управление “Коробковское” ООО “Лукойл-Нижневожскнефть”, 2017. URL: <https://old.neftegaz.ru/catalogue/company/view/309-Neftegazodobyvayuschee-upravlenie-Korobkovskoe-OOO-LUKOYL-Nizhnevozhskneft> (дата обращения: 28.09.17).

при аварийных разливах, утечки при проведении профилактических работ на добывающих и нагнетательных скважинах, фильтрация нефти и пластовых вод из накопителей отходов, неуправляемое фонтанирование нефтью и высокоминерализованными водами при строительстве скважин [1, 4, 6, 8, 11].

Кроме нефтегазопромыслов на территории находятся два разрабатываемых открытым способом месторождения *железных руд*, входящих в состав Камышинского железорудного бассейна: Мокроольховское (Южное и Северное) и Чижевское. Они являются источниками химического и физического техногенного воздействия на литосферу, вызывая загрязнение почв, поверхностных и подземных вод; изменения уровня грунтовых вод (УГВ); провоцирование антропогенного выветривания на отвалах и складах продукции; повышение уровня шума за счет работы механических агрегатов [5, 7]. Содержание основных оксидов в рудах (%): железа – 22.7–36.6 (среднее 31.2), кремния – 21.8–49.6 (среднее 33.6), кальция и магния – 0.6–4.7 (среднее 1.6), фосфора – 0.1–0.4 (среднее 0.27).

Интенсивное **сельскохозяйственное освоение** земель Приволжской возвышенности началось после крестьянской реформы 1861 г., когда проводилось переселение государственных крестьян из центральных губерний России. В настоящее время на территории исследований развито **сельскохозяйственное производство**: зерновое, кормовое и животноводство. Распаханность территории составляет более 70% [2]. Количество минеральных удобрений, вносимых в почву, зависит от вида выращиваемых культур, экономического благосостояния сельхозпредприятий и фермерских хозяйств. В Котовском районе в среднем вносится около 27.1 т минеральных удобрений под зерновые культуры и 1.7 т – под овощные. Преобладают азотные и фосфорные соединения. Объем азотных удобрений составляет приблизительно 13.8 т/год, фосфорных – 25 т/год [10]. Применяются средства защиты растений, которые вносят свой вклад в загрязнение почв, грунтов и поверхностных водоемов. Свою долю в загрязнение компонентов литосферы вносят жидкие стоки – навоз животноводческих ферм и птицефабрик.

Самый крупный город на Доно-Медведицкой гряде Приволжской возвышенности – административный центр г. Котово с населением более 22 тыс. чел. (по переписи населения 2017 г.). На **селитебных территориях** Котовского района основными источниками загрязнения являются бытовые отходы, сточные воды, различные выбросы химических веществ мелкими производствами, свалки твердых бытовых отходов и т.д. Всего в Котовском районе насчитывается 22 свал-

ки, из которых эксплуатируются всего шесть [3]. Самая крупная свалка расположена на юго-западной окраине г. Котово в верховьях небольшой балки – правого притока р. Малая Казанка (бассейн р. Дон). В качестве ложа свалки используется дно глубоковрезанной сильно залесенной балки. По мере подвоза отходов автотранспортом, мусор разравнивают и трамбуют бульдозером, но грунтом не переслаивают. Площадь свалки 8–10 га, она эксплуатируется с 1965 г., ежегодно на свалку свозится свыше 29 тыс. м³ твердых бытовых отходов. По данным ФГБУ “Гидроспецгеология” свалка не оборудована противофильтрационным экраном, ниже по балке перехватывающие дамбы разрушены, обваловка отсутствует, вследствие этого инфильтрат по балке непосредственно поступает в р. Малая Казанка.

На территории исследований расположены четыре **транспортные магистрали**. Главные дорожные магистрали – асфальтированные шоссе Волгоград–Жирновск, Котово–Михайловка, пересекающие площадь листа М-38-ХV (Котово) с юга на север и с востока на запад, а на северо-востоке этого листа геологической карты проходит железная дорога Петров Вал–Балашов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки состояния эколого-геохимических условий исследуемой территории использовались полевые и лабораторные методы.

Полевые методы включали эколого-геологические маршруты и опробование абиотических и биотических компонентов экосистем. Для почвенного опробования была разработана литогеохимическая сеть, в соответствии с которой опробовались рыхлые отложения (гумус или иллювиальный горизонт почвы (горизонты А, В)). Отбор проб производился из специальных копушей или неглубоких шурфов; каждая проба на месте взятия пропускалась через сито с ячейками размером 1 мм² (фракции больше 1 мм удалялись); количество отобранного материала составляло 200–300 г. Частота отбора проб (1 проба на 4 км²) осуществлялась методом “конверта”. Всего было отобрано 1000 проб, куда вошли как тяжелые металлы (Ni, Cu, Pb, Mn, Zn, Mo, Cr), так и редкие элементы (Sc, Zr, V, Y, P, Be, Ti, La, Yb, B, Ba).

Из поверхностных водоемов (рек, прудов, озер) на глубине 20–30 см от поверхности во время полевых работ было отобрано 85 проб воды на определение микрокомпонентного состава по 32 элементам (Mn, Ni, Co, Ti, V, Cr, Mo, W, Zr, Nb, Pb, Cu, Ag, Sb, Bi, As, Zn, Cd, Sn, Ge, Ga, In, Be, Sc, Y, Yb, P, Li, Sr, Ba, Tl, B) батометром ПВ1.0. Объем пробы воды на химический анализ составлял не менее 2 л. Предварительную обработку, транспортировку и хранение проб производили

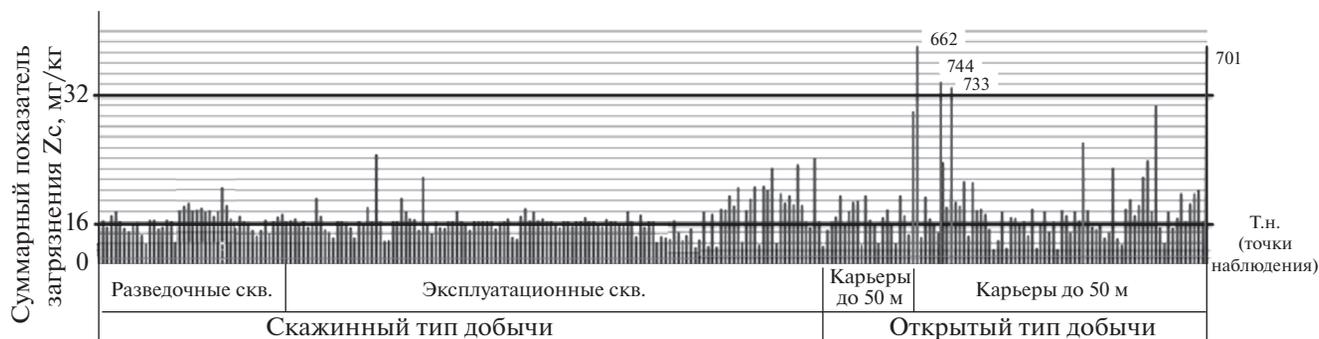


Рис. 1. Состояние почв на горнодобывающей территории по суммарному показателю загрязнения (Z_c). Обозначения: черными горизонтальными линиями отмечены уровни загрязнения почв по Z_c (СанПиН 2.1.7.1287-03): меньше 16 – допустимый, 16–32 – умеренно опасный, больше 32 – опасный. Цифры на графике – номера точек опробования с максимальными значениями Z_c .

таким образом, чтобы в содержании и составе определяемых компонентов и свойствах воды не происходило существенных изменений. Для этого пробу воды консервировали хлороформом (добавляли 2–4 мл $CHCl_3$ на 1 л пробы).

В процессе полевых работ были опробованы донные осадки с использованием пробоотборника ГР51 в количестве 85 проб по тем же 32 элементам, в тех же местах, где происходил отбор проб поверхностных вод.

Отбор растительного материала производился на левобережье р. Медведица (район г. Котово) вручную в период созревания растительности. В качестве фитопроб были использованы растительные остатки пшеницы в количестве 40 проб. В спектр вошли 33 элемента: Mn, Ni, Co, Ti, V, Cr, Mo, W, Zr, Nb, Pb, Cu, Ag, Sb, Bi, As, Zn, Cd, Sn, Ge, Ga, In, Be, Sc, La, Y, Yb, P, Li, Sr, Ba, Tl, B.

Лабораторные методы предусматривали анализы проб воды, почвы и донных отложений, а также растительных образцов, они выполнялись спектральным методом на атомноабсорбционном спектрометре Solaar M6 в ФГУ “Волгагеология” в лицензированной литогеохимической лаборатории.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЙ
ОБСТАНОВКИ ДОНО-МЕДВЕДИЦКОЙ
ГРЯДЫ ПРИВОЛЖСКОЙ
ВОЗВЫШЕННОСТИ**

По результатам спектрального анализа выявлено два основных загрязняющих веществ, распространенных в почве, донных отложениях и поверхностных водах: свинец (Pb) и кадмий (Cd).

Оценка состояния почв производилась с использованием суммарного показателя загрязнения (Z_c) с ранжированием на уровни загрязнения

(СанПиН 2.1.7.1287-03²) отдельно для горнодобывающих (рис. 1), сельскохозяйственных (рис. 2), транспортных (рис. 3) и селитебных территорий. Основными загрязняющими веществами, являются: свинец (Pb) и кадмий (Cd).

Для получения достоверных данных Z_c определялся региональный фоновый уровень загрязнения почв. Была отобрана фоновая проба почв вне сферы локального антропогенного воздействия. Отбор производился на достаточном удалении от поселений (с наветренной стороны), не менее чем в 500 м от автодорог, на землях (лугах, пустошах), где не осуществлялось применение пестицидов и гербицидов.

Установлено, что на горнодобывающих территориях по совокупности техногенных воздействий с учетом работы буровых установок и производственных машин, автотранспорта опасная степень загрязнения почв ($32 < Z_c < 128$) выявлена в районе открытой добычи железной руды, относительно меньшее воздействие оказывает скважинный тип добычи (см. рис. 1). На территориях со скважинным типом добычи минимальные значения Z_c (преимущественно до 16, соответствующие допустимому уровню загрязнения) получены для площадей с разведочными скважинами, которые еще не эксплуатируются. Наибольшие показатели Z_c (от 16 до 32) приурочены к площадям Коробковского нефтегазодобывающего управления, что соответствует умеренно опасному уровню загрязнения.

На сельскохозяйственных угодьях (см. рис. 2), занимающих большую часть исследуемой площа-

² Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации (с изменениями на 25 апреля 2007 года): Москва, 2003.
URL: <http://docs.cntd.ru/document/901859456>



Рис. 2. Состояние почв на сельскохозяйственной территории по суммарному показателю загрязнения (Z_c). Обозначения: см. на рис. 1.

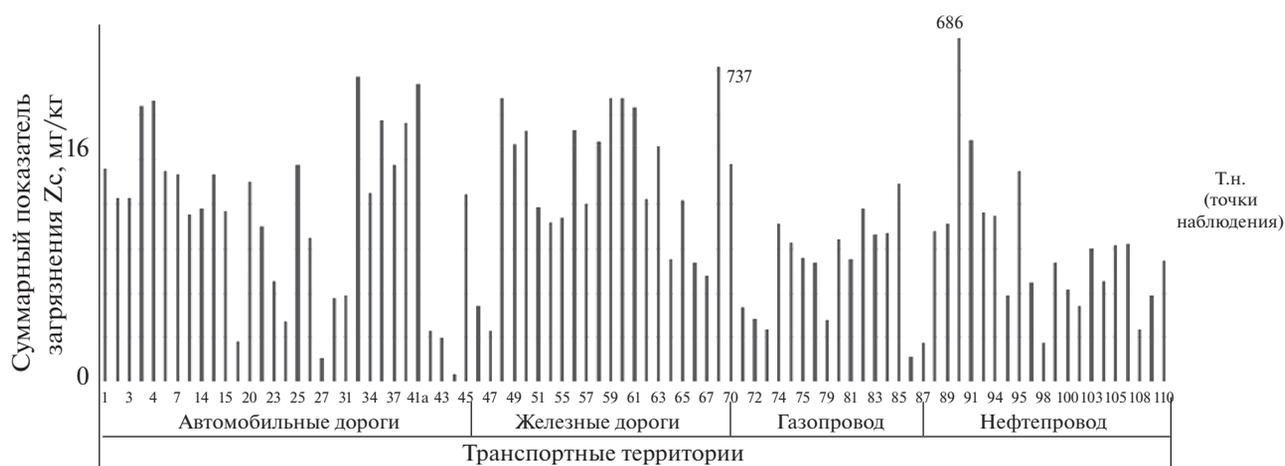


Рис. 3. Состояние почв на транспортных территориях по суммарному показателю загрязнения (Z_c). Обозначения: см. на рис. 1.

ди, выделены территории неорошаемых и орошаемых пашен, сенокосы и пастбища, а также территории животноводческих ферм. Наиболее загрязнены неорошаемые поля, где максимальные показатели суммарного загрязнения варьируются в интервале от 32 до 128 (опасный уровень загрязнения).

На транспортных территориях (см. рис. 3) выделены участки расположения автомобильных и железных дорог, а также газопроводов и нефтепроводов. Территории автомобильных дорог имеют умеренно опасное загрязнение (Z_c изменяется в интервале от 16 до 32), тогда как в районе нефтепровода и газопровода прослеживается ухудшение ситуации в разы, так как происходят аварийные утечки транспортируемых продуктов.

На селитебных территориях показатели Z_c зависят от численности населенного пункта, а также от близости расположения свалок коммунальных отходов и отстойников под сточные и канализационные воды. К примеру, самые крупные населенные пункты – г. Котово и пос. Даниловка с численностью населения более 22 тыс. чел. и не менее 5 тыс. чел., соответственно, характеризуются умеренно опасным загрязнением. Территории большинства же населенных пунктов относятся к допустимому уровню загрязнения.

Оценка состояния поверхностных вод выполнялась с использованием удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ). С помощью УКИЗВ оценивается степень ее загрязненности по комплексу загрязняющих веществ

Таблица 1. Классификация качества воды водотоков по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (РД 52.24.643–2002)

Класс и разряд	Характеристика состояния загрязненности воды	Удельный комбинаторный индекс загрязненности воды					
		без учета числа КПЗ	в зависимости от числа учитываемых КПЗ				
			1 ($k = 0.9$)	2 ($k = 0.8$)	3 ($k = 0.7$)	4 ($k = 0.6$)	5 ($k = 0.5$)
1-й	Условно чистая	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
2-й	Слабо загрязненная	(1; 2]	(0.9; 1.8]	(0.8; 1.6]	(0.7; 1.4]	(0.6; 1.2]	(0.5; 1.0]
3-й	Загрязненная:	(2; 4]	(1.8; 3.6]	(1.6; 3.2]	(1.4; 2.8]	(1.2; 2.4]	(1.0; 2.0]
разряд “а”	загрязненная	(2; 3]	(1.8; 2.7]	(1.6; 2.4]	(1.4; 2.1]	(1.2; 1.8]	(1.0; 1.5]
разряд “б”	очень загрязненная	(3; 4]	(2.7; 3.6]	(2.4; 3.2]	(2.1; 2.8]	(1.8; 2.4]	(1.5; 2.0]
4-й	Грязная:	(4; 11]	(3.6; 9.9]	(3.2; 8.8]	(2.8; 7.7]	(2.4; 6.6]	(2.0; 5.5]
разряд “а”	грязная	(4; 6]	(3.6; 5.4]	(3.2; 4.8]	(2.8; 4.2]	(2.4; 3.6]	(2.0; 3.0]
разряд “б”	грязная	(6; 8]	(5.4; 7.2]	(4.8; 6.4]	(4.2; 5.6]	(3.6; 4.8]	(3.0; 4.0]
разряд “в”	очень грязная	(8; 10]	(7.2; 9.0]	(6.4; 8.0]	(5.6; 7.0]	(4.8; 6.0]	(4.0; 5.0]
разряд “г”	очень грязная	(10; 11]	(9.0; 9.9]	(8.0; 8.8]	(7.0; 7.7]	(6.0; 6.6]	(5.0; 5.5]
5-й	Экстремально грязная	(11; ∞]	(9.9; ∞]	(8.8; ∞]	(7.7; ∞]	(6.6; ∞]	(5.5; ∞]

*Круглая скобка – число не входит в интервал, квадратная скобка – число входит в интервал

(РД 52.24.643–2002³) и устанавливается класс качества воды (табл. 1).

Классификация качества воды по степени загрязненности осуществляется с учетом следующих данных: комбинаторного индекса загрязненности воды ($S_j = 32$), числа критического показателя загрязненности воды (КПЗ = 1), коэффициента запаса ($k = 0.9$), количества учтенных в оценке ингредиентов и показателей загрязненности ($N_j = 2$).

Для поверхностных вод Доно-Медведицкой гряды Приволжской возвышенности по комплексу загрязняющих веществ (Cd и Pb) установлен класс 2 качества воды по показателю УКИЗВ; характеристика состояния загрязненности воды – слабо загрязненная.

Оценка состояния донных отложений в руслах рек Медведица и Иловля с притоками производилась с использованием суммарного показателя загрязнения (Z_c) с ранжированием на уровни загрязнения [9]. Донные отложения с опасной степенью загрязнения приурочены к верховьям долины Медведицы, где находятся горнодобывающие территории. В донных отложениях Иловли зафиксировано повышенное содержание свинца, ванадия, титана, но их количество не превышает умеренно опасные и опасные концентрации.

³ Руководящий документ РД 52.24.643–2002 “Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязнения поверхностных вод по гидрохимическим показателям” (утв. и введен в действие Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды): Ростов-на-Дону, 2002. URL: <http://base.garant.ru/70467388/>

Для **оценки состояния фитоценозов** использовались растительные остатки пшеницы. Основные загрязняющие вещества – никель, медь, свинец, цинк, кадмий. В отдельных точках содержание свинца в растительных остатках изменяется от <10 до 23.7 мг/кг при ПДК = 0.5 мг/кг, т.е. более ПДК в 47.4 раза (СанПиН 2.3.2.1078–01⁴). Содержание кадмия по сравнению с ПДК низкое, по всем анализам оно составило менее 10 мг/кг при ПДК = 50 мг/кг.

КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Оценка состояния наземных экосистем осуществлялась только на левобережье р. Медведица, что связано с отбором проб растительности на этом участке.

Картографическое отображение оценки состояния наземных экосистем осуществлялось на основе районирования территории с учетом сопряженного состояния компонентов литосферы (почв, донных отложений, поверхностных вод) и растительных остатков пшеницы путем использования абиотических и биотических критериев по содержанию Pb и Cd [12]. На карте эколого-геохимического районирования (рис. 4) дана

⁴ Санитарные правила и нормы СанПиН 2.3.2.1078–01 Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации постановлением от 14 ноября 2001 года N 36 (с изменениями на 6 июля 2011 года): Москва, 2001. <http://docs.cntd.ru/document/901806306>

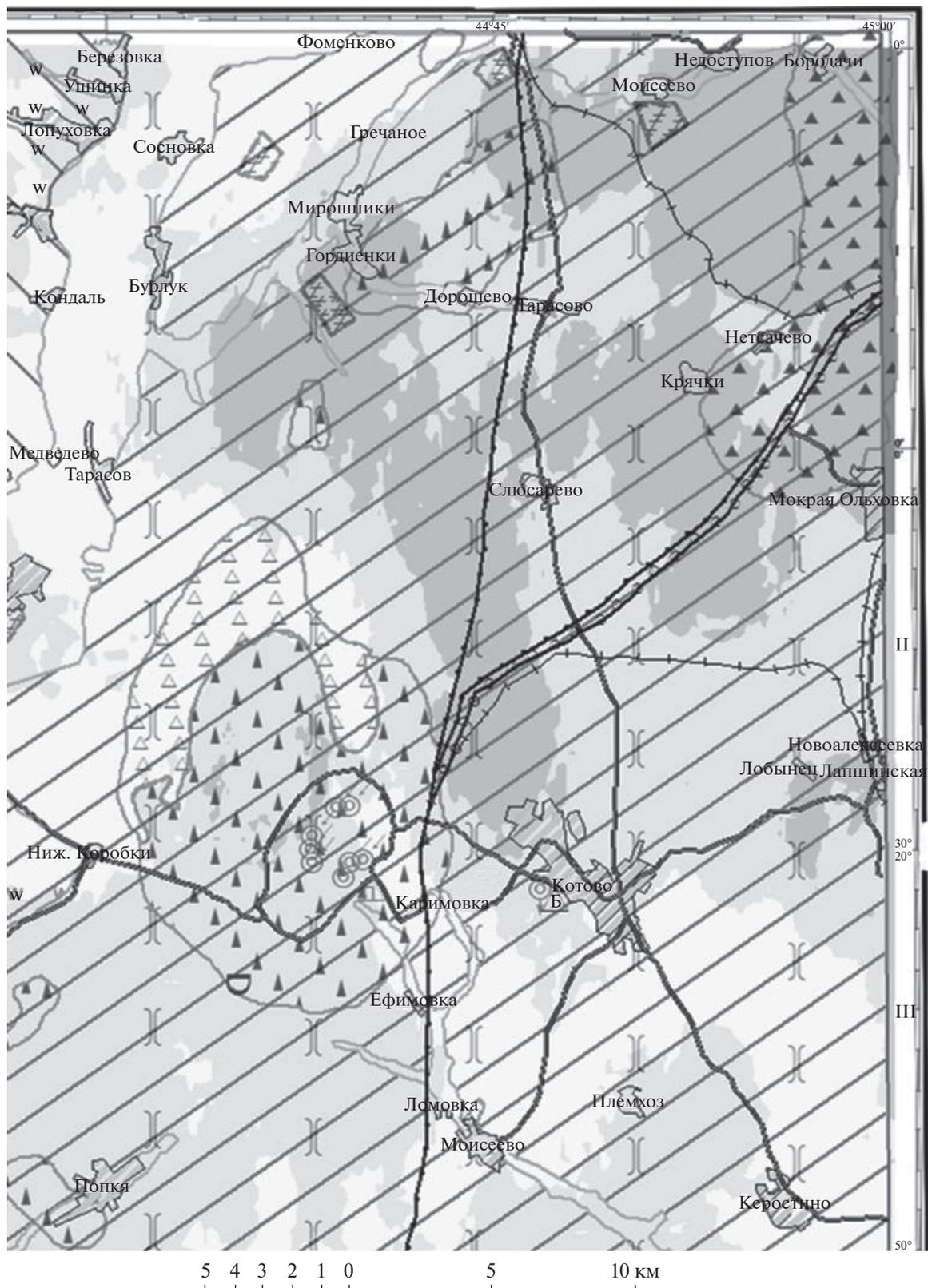


Рис. 4. Карта эколого-геохимического районирования левобережья р. Медведица (р-н г. Котово). Условные обозначения см. рис. 5.

I. Типизация ландшафтных систем и их геологической основы

Зоны:

I) суббореального типичного ландшафта

Подзоны:

- 1) сухостепная с южными черноземными почвами
 D1П-2 (наклонная, ярусная, субгоризонтальная равнина на осадочных породах)
- 2) сухостепная с темно-каштановыми, каштановыми частично солонцеватыми почвами
 D2П-2 (наклонные, ярусные, субгоризонтальные равнины на осадочных породах)

II) субаквального ландшафта

-  плоская аллювиальная равнина и I надпойменная терраса (мелкозернистая, тонкозернистая, пески, суглинки, супеси)

II. Критерии состояния эколого-геологических условий

Классы состояния эколого-геологических условий	Абиотические компоненты экосистемы			Биотический компонент экосистемы		Зоны нарушенности экосистемы
	Почва	Донные отложения	Поверхностные воды	Растительность		
	Zс, суммарный показатель загрязнения (по СанПиН 2.1.7.1287-03)	Zс, суммарный показатель загрязнения (Саст. 1990)	УКИЗВ, удельный комбинаторный индекс загрязненности воды при КПЗ = 1 (по РД 3.2.24.643-2002)	Концентрация химических элементов в растительных остатках пшеницы, мг/кг (по СанПиН 2.3.2.560-96)		
				Pb	Cd	
Условно-удовлетворительный	16 – 32	10 – 30	0.9 – 1.8	0.5 – 2	0.4 – 1.6	Риск
Неудовлетворительный	32 – 128	30 – 100	1.8 – 3.6	2 – 8	1.6 – 6.4	Кризис
Катастрофический	>128	>100	>3.6	>8	>6.4	Бедствие

III. Функциональная организация территории

I. Горнодобывающие территории

- Сважинный тип добычи**
-  Скважины разведочные
-  Скважины эксплуатируемые
- Открытый тип добычи**
-  Карьеры до 50 (железная руда)

Прочие обозначения

-  Участки захоронения жидких токсичных отходов
-  Закачка попутных вод нефтепромыслов в недра
-  Полигоны захоронения промышленных отходов бурения

II. Сельскохозяйственные территории

-  Орошенные поля
-  Сенокосы и пастбища
-  Неорошаемые пашни

III. Селитебные территории

-  Населенные пункты
-  Свалки бытовых отходов
-  Отстойники

IV. Транспортные территории

-  Газопровод
-  Нефтепровод
-  Железная дорога
-  Автомобильные дороги

IV. Прочие обозначения

-  Граница ландшафтов и морфоструктур

Рис. 5. Условные обозначения к карте эколого-геохимического районирования левобережья р. Медведица (р-н г. Котова).

оценка современного состояния эколого-геологических условий с выделением классов состояния литосферы и связанных с ними зон нарушенности экосистем.

Легенда карты эколого-геохимического районирования левобережья р. Медведицы состоит из четырех блоков (рис. 5).

I. Типизация ландшафтов. В пределах территории была выделена одна ландшафтная зона – суббореальная типичная, и две ландшафтные подзоны. Выделение данных структур позволяет учитывать особенности миграции элементов.

II. Критерии оценки состояния эколого-геологических условий и зон нарушенности экосистем. Данный блок посвящен комплексной оценке со-

стояния эколого-геологических условий литосферы с переходом на зоны нарушения экосистем. Раздел представлен в виде матрицы, где в левой части по вертикали даны три из четырех возможных классов⁵ состояния эколого-геологических условий (*условно удовлетворительный, неудовлетворительный и катастрофический*), в центральной части по горизонтали – критерии оценки абиотических (суммарный показатель загрязнения для почв и донных осадков, удельный комбинаторный индекс загрязненности воды) и биотических (содержание тяжелых металлов в растительности) компонентов. В правой части таблицы-матрицы приведены экологические последствия для экосистем с выделением зон экологического риска, кризиса и бедствия.

III. Функциональная организация территории предоставляет информацию о различных типах хозяйственного использования территории: горнодобывающей, сельскохозяйственной, селитебной и транспортной. Функциональная организация территории на карте отображается крапом и спецзнаками.

IV. Прочие обозначения касаются типов границ, используемых на карте.

Графически информация отображается фоновой окраской по “доминанте наихудшего” показателя всех составляющих экосистемы, включая абиотические и биотические ее части.

Отдавая себе отчет в несовершенстве нормативной базы по критериям оценки компонентов экосистем, в недостатке использования для эколого-геохимических оценок концентраций валовых, а не подвижных форм химических элементов-загрязнителей, можно констатировать, что на описываемой площади эколого-геологическое состояние литосферы оценивается преимущественно как условно-удовлетворительное и неудовлетворительное. *Катастрофическое* эколого-геологическое состояние и соответствующая ему зона нарушения “бедствие” экосистем по доминанте наихудшего показателя (концентрации тяжелых металлов в растительности) приурочены к производственным горнодобывающим и транспортным территориям. В северо-восточной части территории сильное влияние на наземные экосистемы оказывает производственная деятельность, связанная с карьерной разработкой железной руды открытым способом, в центральной и северной части листа М-38-ХV (Котово) – функционирование нефтепровода и добыча нефти.

⁵ В связи с высокой техногенной нагрузкой, интенсивным сельскохозяйственным использованием земель в течение полутора веков и существованием действующих нефтяных промыслов на левобережье р. Медведица *удовлетворительный класс* состояния эколого-геологических условий не выделялся.

Неудовлетворительное эколого-геологическое состояние и соответствующая ему зона нарушения экосистем “кризис” определяются по доминанте почвенных показателей и связаны с территориями традиционного земледелия, освоение которых произошло еще в середине XIX в. и массовым использованием сельскохозяйственных удобрений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основным источником техногенного воздействия на наземные экосистемы Доно-Медведицкой гряды Приволжской возвышенности являются горнодобывающие комплексы, связанные с открытой и скважинной разработкой железных руд, а также транспортом нефти. На техногенное загрязнение этих территорий оказывают влияние разливы буровых растворов, утечки из шламохранилищ, утечки пластовой продукции из нефтепроводов при аварийных разливах, утечки при проведении профилактических работ на добывающих и нагнетательных скважинах, работающая техника в карьерах, автотранспорт, используемый для перевозки руды и другие факторы.

2. Экспериментально установлено, что из 24 химических элементов, выявленных в почве, донных отложениях, поверхностных водах и растительных остатках пшеницы, основные загрязнители по валовым концентрациям – свинец и кадмий.

3. Среднемасштабная картографическая оценка состояния экосистем левобережья р. Медведица, выполненная на основе сопряженного учета состояния абиотической и биотической частей экосистем с использованием нормированных абиотических и биотических критериев по доминанте наихудшего показателя, позволила обособить территории с экологически тяжелой обстановкой, расположенные на северо-востоке исследуемой территории.

4. Составление карты эколого-геохимического районирования позволило пространственно обособить территории с определенным классом состояния эколого-геологических условий и экологическим состоянием систем. В условиях высокой техногенной нагрузки состояние экосистем на большей части левобережья р. Медведица определяется как риск.

5. Данные, собранные в период работы и составления карты эколого-геохимического районирования, вошли в основополагающую базу для создания карты эколого-геологических условий листа М-38-ХV (Котово), в рамках государственного задания № 049-00004-17 00 ФГБУ “Гидро-спецгеология”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьева И.Ю., Баранов Д.Ю., Абызова А.М. Особенности рекультивации нефтезагрязненных территорий в условиях Западной Сибири // Инженерные изыскания. 2015. № 13. С. 48–54.
2. Воробьев А.В. (ред.). Земельные ресурсы Волгоградской области. Волгоград: Изд-во “Волгоград”, 1997.
3. Доклад “О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2017 году” / Под ред. А.О. Кульбачевского. М.: ДПиООС, 2018. 358 с.
4. Корпакова И.Г., Павленко Л.Ф., Ларин А.А., Скрыпник Г.В. и др. Углеводороды в воде и донных отложениях Азовского моря в пределах лицензионного участка ООО “НК “ПРИАЗОВНЕФТЬ” // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 11. С. 10–17.
5. Косинова И.И., Барабошкина Т.А., Косинов А.Е., Ильяш В.В. Экологическая геология Курской магнитной аномалии (КМА). Воронеж: Издательско-полиграфический центр ВГУ, 2009.
6. Матишов Г.Г., Никитин Б.А., Сочнев О.Я. Экологическая безопасность и мониторинг при освоении месторождений углеводородов на арктическом шельфе. М.: Газоил пресс, 2001.
7. Ольховатенко В.Е. Геоэкологические проблемы разработки открытым способом угольных месторождений Кузнецкого бассейна // Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых: матер. IX Сергеевских чтений. Вып. 19. М.: РУДН, 2017. С. 67–72.
8. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. и др. Результаты экологического мониторинга шламовых амбаров нефтегазодобычи севера Западной Сибири // Обращение с отходами: задачи геоэкологии и инженерной геологии: матер. XX Сергеевских чтений. Вып. 20. М.: РУДН, 2018. С. 199–204.
9. Сает Ю.Е. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сает, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. М.: Недра, 1990. 333 с.
10. Светашова К.Д., Харькина М.А. Эколого-геохимические условия северо-западной части Приволжской возвышенности // Геология в развивающемся мире: матер. X междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2018. С. 410–413.
11. Трофимов В.Т., Николаев А.В., Жигалин А.Д., Барабошкина Т.А., Харькина М.А., Архипова Е.В. Расширение добычи нефти и газа и возрастание экологического риска // Вестник Московского университета. Сер. 4: Геология. 2017. № 3. С. 7–16.
12. Трофимов В.Т., Харькина М.А. О содержании и назначении геоэкологических карт // Инженерные изыскания. 2017. № 1. С. 32–38.

ENVIRONMENTAL AND GEOCHEMICAL SITUATION IN THE KOTOVSKY AREA, THE VOLGA REGION, AND THE STATE OF SURFACE ECOSYSTEMS ON THE LEFT BANK OF MEDVEDITSYA RIVER UNDER STRONG ANTHROPOGENIC LOAD

K. D. Svetashova^{a,b,##}, M. A. Khar'kina^{a,#}, and N. S. Grokhol'skii^{b,c,###}

^a Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, 1, Moscow, 119991 Russia

^b Gidrospetsgeologiya, ul. Marshala Rybalko, 4, Moscow, 123060 Russia

^c Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, ul. Miklukho-Maklaya, 23, Moscow, 123060 Russia

[#] E-mail: info@rector.msu.ru

^{##} E-mail: info@specgeo.ru

^{###} E-mail: office@mgri.ru

Data are provided on the ecological and geochemical situation as well as technogenic load in the Don-Medveditsya ridge, the northwestern part of the Volga Upland, Kotovskii District. The industrial complexes associated with open cast mining of iron ore and oil fields are found to be the main sources of technogenic impact there. Proceeding from the results of spectral analysis, two main polluting chemical elements were identified in geocomponents, i.e., lead (Pb) and cadmium (Cd), out of 24 chemical elements found in soil, bottom sediments, surface water and plant residues of wheat. The state of terrestrial ecosystems is assessed, including the abiotic (soil, surface water, and bottom sediments) and biotic (wheat plant residues) parts. On the basis of a coupled recording of the state of the lithosphere and phytocenoses using traditional geological and biotic criteria, a map of ecological and geochemical zoning of the left bank of the Medveditsya River was compiled to a scale of 1 : 200000. The ecological-geochemical zoning made it possible to distinguish territories with a certain class of ecological-geological conditions and the ecological state of systems. The aim of this study was to assess and reveal transformation in ecological-geochemical conditions under the impact of various anthropogenic factors within the area of Don-Medveditsya ridge, the Cis-Volga Upland.

Keywords: ecological and geological conditions, soil, bottom sediments, surface waters, vegetation, quarries, oil fields

REFERENCES

1. Grigor'eva, I.Yu., Baranov, D.Yu., Abyzova, A.M. *Osobennosti rekul'tivatsii neftezagryaznennykh territorii v usloviyakh Zapadnoi Sibiri* [Features of reclamation of oil-contaminated territories in Western Siberia]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2015, no. 13, pp. 48–54. (in Russian)
2. Vorobyov, A.V. (Ed.) *Zemel'nye resursy Volgogradskoi oblasti* [Land resources of the Volgograd region]. Volgograd, Volgograd Publ., 1997. (in Russian)
3. *O sostoyanii okruzhayushchei sredy v gorode Moskve v 2017 godu* [On the state of the environment in the city of Moscow in 2017]. A.O. Kul'bachevskii, Ed., Moscow, DPiOOS Publ., 2018, 358 p. (in Russian)
4. Korpakova, I.G., Pavlenko, L.F., Larin, A.A., Skrypnik, G.V., et al. *Uglevodorody v vode i donnykh otlozheniyakh Azovskogo morya v predelakh litsenzionnogo uchastka OOO "NK PRIAZOVNEFT"* [Hydrocarbons in water and bottom sediments of the Azov Sea within the licensed area of LLC Prikazneft]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*, 2014, no. 11, pp. 10–17. (in Russian)
5. Kosinova, I.I., Baraboshkina, T.A., Kosinov, A.E., Ilyash, V.V. *Ekologicheskaya geologiya Kurskoi magnitnoi anomalii (KMA)* [Ecological geology of the Kursk magnetic anomaly (KMA)]. Voronezh, IPTs VGU Publ., 2009. (in Russian)
6. Matishov, G.G., Nikitin, B.A., Sochnev O.Ya. *Ekologicheskaya bezopasnost' i monitoring pri osvoenii mestorozhdenii uglevodorodov na Arkticheskom shel'fe* [Environmental safety and monitoring during the development of hydrocarbon deposits on the Arctic shelf]. Moscow, Gazoil Press, 2001. (in Russian)
7. Ol'khovatenko, V.E. *Geoekologicheskie problemy razrabotki otkrytym sposobom ugol'nykh mestorozhdenii Kuznetskogo basseina* [Geoecological problems in open pit mining of coal deposits in the Kuznetsk basin]. Geoecological safety of the development of mineral deposits. Proc. 19th annual conf. in commemoration of academician E.M. Sergeev, Moscow, 2017, pp. 67–72. (in Russian)
8. Opekunova, M.E., Opekunov, A.Yu., Kukushkin, S.Yu., Ganul A.G., et al. *Rezul'taty ekologicheskogo monitoring shlamovykh ambarov neftegazodobychi severa Zapadnoi Sibiri* [The results of environmental monitoring of sludge pits for oil and gas production in the north of Western Siberia]. Waste management: problems of geoecology and engineering geology, Proc. 20th annual conf. in commemoration of academician E.M. Sergeev, Moscow, 2018, pp. 199–204. (in Russian)
9. Saet, Yu.E. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 333 p. (in Russian)
10. Svetashova, K.D., Khar'kina, M.A. *Ekologo-geokhimiicheskie usloviya severo-zapadnoi chasti Privolzhskoi vyzhshennosti* [Ecological and geochemical conditions of the northwestern part of the Volga Upland]. Geology in the developing world. Proc. 10th Intern. Sci. and Practical Conf. of Young Professionals, Perm, PGNIY Publ., 2018, pp. 410–413. (in Russian)
11. Trofimov, V.T., Nikolaev, A.V., Zhigalin, A.D., Baraboshkina, T.A., Kharkina, M.A., Arkhipova, E.V. *Rasshirenje dobychi nefiti i gaza i vozrastanie ekologicheskogo riska* [Expanding oil and gas production and increasing environmental risk]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 4: Geologiya*, 2017, no. 3, pp. 7–16. (in Russian)
12. Trofimov, V.T., Kharkina, M.A. *O sodержanii i naznachenii geoekologicheskikh kart* [On the content and purpose of geoecological maps]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2017, no. 1, pp. 32–38. (in Russian)

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 550.424

ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ПОДВИЖНОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВАХ МАЛОПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРОДОВ АМУРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2021 г. Н. А. Бородина^{1,*}, В. И. Радомская^{1,**}

¹ Институт геологии и природопользования ДВО РАН, пер. Речочный, 1, Благовещенск, 675000 Россия

*E-mail: Borodina53@yandex.ru

**E-mail: Radomskaya@ascnet.ru

Поступила в редакцию 28.04.2021 г.

После доработки 18.05.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Исследованы особенности накопления и распределения тяжелых металлов (Cu, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, Pb, Cd) в почвах наиболее крупных городов Амурской области: Благовещенска, Белогорска и Свободного. Основными техногенными загрязнителями урбаноземов исследуемых городов являются Zn, Pb, Mn, Cu. Оценка фракционного распределения тяжелых металлов (ТМ) показала, что поступающие в урбаноземы металлы в основном аккумулируются: Cu – во фракции, связанной с органическим веществом; Mn – связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn; Zn и Cd – связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn и специфически сорбированной; Ni, Co, Pb и Cr – связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn и органическим веществом. С возрастом техногенной нагрузки увеличивается доля подвижных форм ТМ (оксидной, связанной с органическим веществом и специфически сорбированной). Установлено, что в городских почвах возрастает потенциальная подвижность ТМ по сравнению с фоновой территорией. В почвах трех городов наибольшую потенциальную опасность среди изученных элементов представляют Zn, Cd и Mn, у которых потенциальная мобильность соответствует высокому уровню опасности. Средний риск включения в пищевые цепи характерен для Pb, Ni, Co.

Ключевые слова: тяжелые металлы, подвижность, фракционный состав, городские почвы, техногенное загрязнение

DOI: 10.31857/S0869780921040020

ВВЕДЕНИЕ

Изучение техногенного загрязнения окружающей среды – одна из актуальных проблем в экологических исследованиях. Урбанизация и техногенное воздействие способствуют изменению свойств городских почв, распределению элементов по почвенному профилю и их активному включению в процессы биогеохимической миграции. Урбанизированным территориям в настоящее время уделяется пристальное внимание исследователей. Это обусловлено серьезным нарушением комфортности среды обитания в городских экосистемах. Техногенные элементы и их соединения в городских почвах в значительной степени подвергаются различного рода трансформациям и практически не выводятся из экосистемы, постоянно накапливаясь в трофических цепях, что отличает городские почвы от естественных.

В промышленных центрах России, ближнего и дальнего зарубежья ведутся большие экологи-

геохимические исследования. В Амурской области подобные исследования также имеют место. Изучением экологического состояния Благовещенска, в том числе загрязнения почв тяжелыми металлами (ТМ), занимались многие исследователи [2, 9, 11, 12]. Работы этих авторов направлены, в основном, на определение валового содержания ТМ в почвах и их кислоторастворимых форм. Для выяснения поведения ТМ в почвах, их подвижности и доступности для живых организмов необходимы знания о других формах существования ТМ, более значимых и информативных в отношении действия на биоту.

Практически не изучены формы соединений ТМ при различной степени загрязнения почв малопромышленных городов Амурской области, в которых отсутствуют крупные промышленные предприятия, но имеется много мелких и средних источников загрязнения, свойственных урбанизированным территориям. Исследования проводили в городах Амурской области с наибольшим

количеством населения: Благовещенск, Белогорск и Свободный, которые являются территориями опережающего развития Приамурья.

Благовещенск – административный центр Амурской области, находится на государственной границе с КНР, занимает площадь 321 км² с населением 226 тыс. человек [1]. Объем промышленного производства в нем сравнительно небольшой. Работающие предприятия в городе – заводы стройматериалов, железо-бетонных изделий, “Амурский металлист”, судостроительный, асфальтовый и домостроительный комбинаты, предприятия пищевой промышленности. Основные загрязнители атмосферного воздуха в Благовещенске – стационарные источники промышленных предприятий, ТЭЦ, котельных предприятий коммунального хозяйства и автотранспорт. В Благовещенске намечено строительство предприятий по производству микробиологических удобрений и комбикормов, создается комплекс по переработке нефти и транспортировке нефтепродуктов.

Свободный – второй по занимаемой площади город Приамурья – 225 км², с населением 58 тыс. человек [1], расположен на правом берегу р. Зея. Основные предприятия – электроаппаратный и вагоноремонтный заводы, а также предприятия пищевой промышленности. В Свободном формируется новый уникальный центр газопереработки и газохимии. В активной стадии строительство одного из крупнейших в стране и мире Амурского газоперерабатывающего завода. Также ведется строительство нового стартового комплекса для ракет-носителей на космодроме “Восточный” вблизи Свободного. В Свободненской зоне опережающего развития будут сформированы строительный комплекс, высокотехнологичное приборостроение и машиностроение, ориентированные на обеспечение потребностей строительства и функционирования космодрома.

Белогорск расположен на левом берегу нижнего течения р. Томь – бассейна р. Зея, занимает площадь 136 км², с населением 65 тыс. человек [1]. Действующие предприятия – ОАО Комбинат “Восточный”, ООО ЗЖБК “Монолит”, ООО “Строительная Компания “Мост-Восток”, вагонное и локомотивное депо. Белогорск – крупный транспортный узел Транссибирской магистрали. В городе осуществлен ввод первой очереди завода по глубокой переработке сои. Планируется осуществить пуск завода по изготовлению металлоконструкций, а также предприятий, специализирующихся на выпуске пиломатериалов и древесного угля, строительных материалов, переработке промышленных отходов.

Перспективы развития Амурской области по реализации этих масштабных проектов диктуют необходимость детального изучения экологиче-

ского состояния городов Благовещенск, Белогорск и Свободный, в частности, изменения форм соединений ТМ в почвах в зависимости от уровня техногенной нагрузки. Данная работа может служить в качестве отправной точки при изучении изменения окружающей среды в Амурской области от воздействия вновь создаваемых промышленных предприятий.

Цель данной работы – изучение фракционного состава соединений тяжелых металлов (Cu, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, Pb, Cd) в почвах малопромышленных городов Амурской области в зависимости от уровня техногенного загрязнения окружающей среды.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования служили почвы разных функциональных зон городов: промышленной, транспортной, селитебной, рекреационной и фоновой. В Благовещенске использовали 34 пробные площадки, в Белогорске и Свободном – по 10. В качестве фона в Благовещенске была выбрана территория заповедного урочища Мухинка, расположенная в 38 км северо-восточнее города, в Белогорске и Свободном – участки лесных массивов в 20 км от городов, которые испытывают минимальное антропогенное воздействие.

Отбор образцов почв проводили по ГОСТ Р 53123-2008. Валовое содержание ТМ в почвах определяли после разложения смесью концентрированных кислот: фтористоводородной, азотной и соляной с последующим растворением в растворе 1 М соляной кислоты. Для характеристики техногенной составляющей почв использовали кислоторастворимые формы ТМ в вытяжках 1 М соляной кислоты.

Для выделения форм ТМ различной подвижности использован метод последовательной экстракции ТМ из одной навески почвы. Доля каждой выделенной фракции, в %, рассчитывалась относительно валового содержания. Были определены формы (или фракции) соединений ТМ в почвах.

I. Водорастворимая фракция содержит соединения ТМ, переходящих в водную вытяжку. Для извлечения этой фракции брали почву и бидистиллированную воду в соотношении 1:10, встряхивали 1 ч. Раствор центрифугировали и концентрировали упариванием в 10 раз.

II. Специфически сорбированная фракция ТМ. Эту фракцию выделяли ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4.8 в соотношении почва:раствор – 1:10 в течение 1 ч при непрерывном встряхивании. При этом выделяются из почвы легко подвижные формы ТМ, которые отли-

Таблица 1. Концентрация ТМ (мг/кг) в урбаноземах городов

ТМ	Благовещенск ($n = 68$)	Белогорск ($n = 20$)	Свободный ($n = 20$)	Фон	ПДК, ОДК
Cu	(14.0–72.0) 25.3 ± 10	(11.0–44.0) 20.1 ± 10	(14.0–44.0) 22.7 ± 10	8.0–12.0	132
Zn	(32.0–739) 103 ± 42	(33.0–92.0) 66.0 ± 20	(41–113) 75.3 ± 26.6	25.0–32.0	220
Mn	(204–1647) 649 ± 332	(246–859) 536 ± 198	(276–763) 500 ± 189	229–280	1500
Cr	(14.0–200) 64.2 ± 23	(61.0–211) 102 ± 56	(18.0–178) 73.7 ± 34	28.0–32.0	90
Ni	(6.0–61.9) 23.0 ± 10	(8.5–28.5) 18.2 ± 6.4	(9.3–40.4) 23.4 ± 10	11.0–17.0	80
Co	(4.0–47.0) 11.9 ± 4.5	(2.0–9.1) 5.1 ± 2.3	(8.0–20.0) 14.0 ± 5.0	4.0–6.0	–
Pb	(19.6–311) 63.3 ± 26	(23.9–92.2) 513 ± 22	(26.7–96.9) 45.8 ± 23	8.1–12.5	130
Cd	(<1.0–2.2) /< 1.0	<10/< 10	(<1.0–1.4) < 1.0	<1.0	2
Z _c	(5.4–67.0) 17.5	(6.0–16.8) 12.3	(4.0–14.0) 9.7	1.0	

Примечания: полужирным шрифтом выделено среднее значение; в скобках – диапазон концентраций ТМ; ± – стандартные отклонения от среднего арифметического; n – число проб.

чаются высокой миграционной способностью и биологической доступностью.

III. Фракция ТМ, связанная с аморфными оксидами и гидроксидами Fe и Mn, содержит металлы, образующие прочные комплексы на поверхности гидратированных оксидов Fe и Mn и высвобождающиеся при их разрушении. Фракцию выделяли с помощью 0.04 М раствора гидроксил-аминна солянокислого в 25% растворе уксусной кислоты при температуре 96°C в течение 6 ч, периодически помешивая через каждые 15 мин. [15]. Фракция характеризует содержание потенциально-подвижных форм ТМ.

IV. Фракция, связанная с органическим веществом. К ней относятся металлы, образующие комплексы с органическим веществом, а также подвергающиеся частичному разрушению сульфиды ТМ. Фракцию выделяли после разрушения органического вещества почвы 30% раствором пероксида водорода в кислой среде (рН 2) при 85°C в течение 2 ч и последующим экстрагированием ТМ раствором ацетатно-аммонийного буфера (рН 4.8) в течение 1 ч.

V. Остаточная фракция. Содержит ионы ТМ, прочно закрепленные в кристаллических решетках минералов почвы. Содержание металлов в остаточной фракции рассчитывали по разности между валовым их содержанием и суммой других выделенных фракций.

Для оценки степени загрязнения почв ТМ использовали нормативы содержаний химических веществ в почвах – ПДК (ГН 2.1.7.2041-06) и ОДК (ГН 2.1.7.2511-09) и показатель суммарного загрязнения (Z_c), который рассчитывали по формуле: $Z_c = \sum K_c - (n - 1)$, где Z_c – суммарный показатель загрязнения; K_c – коэффициенты концентраций элементов; n – число химических элементов с $K_c > 1$. Коэффициент концентрации K_c рассчитывали по формуле:

$$K_c = C_i / C_{ф}, \quad (1)$$

где C_i – содержание определяемого элемента в почве; $C_{ф}$ – фоновое содержание этого элемента.

Потенциальную подвижность элементов (M_{Fp}) рассчитывали по формуле:

$$M_{Fp} = (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) / C_{вал} \times 100\%, \quad (2)$$

где F_1, F_2, F_3, F_4 – концентрация элемента в водорастворимой, специфически сорбированной, гидроксидной и органической фракциях ТМ, $C_{вал}$ – валовое содержание поллютанта.

Измерение концентраций ТМ проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре “Hitachi”-180-50, iCE-3000 Series в ацетилено-воздушном пламени, на ААС “Анналист 400” в Центре лабораторного анализа и технических измерений” по Амурской области (Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.511649). Статистическая обработка экспериментальных данных проведена с использованием программы Microsoft Office Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В городских почвах отмечены повышенные валовые содержания ТМ, которые в урбаноземах варьирует в широких пределах и превышают фоновые концентрации (табл. 1).

В Белогорске и Свободном концентрации ТМ в почвах, кроме Cr, ниже ПДК и ОДК. На трех площадках Белогорска (мелькомбинат, завод ЖБИ и горпарк) и Свободного (вагоноремонтный и электроаппаратный заводы и городская больница) отмечено превышение ПДК Cr в 2 раза.

В Благовещенске превышение ПДК для почв зафиксировано по Mn в урбаноземах района судостроительного завода, где концентрация Mn достигала 1647 мг/кг (ПДК 1500 мг/кг). Выявлено превышение ПДК Cr на 3 площадках промышленной зоны в 1.2–2 раза, которое объясняется загрязнением почв хромом, содержащимся в отходах мелких предприятий по деревообработке и

производству мебели (район спичфабрики), где хром выщелачивается из красок и пропитанной ими древесины [5]. На одной площадке, где отмечено максимальное содержание Cr (200 мг/кг) возможно влияние полигона бытовых отходов (по розе ветров). Повышенные концентрации Zn отмечены в урбаногемах промышленной зоны (до 739 мг/кг – силикатный завод), что превышает ОДК для почв почти в 3.5 раза. Источниками накопления Zn на данных территориях могут быть промышленные выбросы, коррозия металлических частей зданий и автотранспортное загрязнение. На почвы набережной р. Амур, где содержание Zn в почве 191 мг/кг, может оказывать влияние находящийся рядом электроаппаратный завод или пылевые потоки из Китая.

Концентрация Cd урбаногемах Благовещенска незначительна (<1.0 мг/кг), за исключением 5 площадок промышленной зоны, где содержание Cd выше кларка, но ниже ОДК и варьирует от 1.0 до 2.2 мг/кг, что обусловлено техногенным привнесением данного элемента. Cd содержится в лакокрасочных материалах, батареях и аккумуляторах, а также применяется как антикоррозийный материал. В небольших количествах Cd выделяется при сжигании топлива [5].

Валовые концентрации Pb в урбаногемах Благовещенска превышают фоновый показатель в 1.8–38 раз. Максимальные валовые концентрации Pb (в мг/кг) зафиксированы в индустриоземах спичфабрики и силикатного завода – 177 и 311, где превышение ОДК составляет 1.3–2.4 раза соответственно. Pb попадает в почву при сгорании жидкого топлива, при разрушении аккумуляторных пластин и частично с отходами предприятий деревообрабатывающей промышленности (Pb₃O₄ – свинцовый сурик, пигмент красок) [5].

Концентрации Cu и Ni в урбаногемах Благовещенска не превышают ОДК, хотя наблюдается некоторая аккумуляция этих элементов, отражающая антропогенное влияние, к которому относятся выбросы котельных и автотранспорта [6].

Концентрации химических элементов в почвах городов варьируют в широком диапазоне в зависимости от хозяйственного использования городских территорий. Особенно значимые превышения фона в урбаногемах Благовещенска были выявлены для Pb, Zn, Cu и Mn, Свободного – для V, а Белогорска – для Cr.

Города Амурской области являются малопромышленными городами, в связи с чем отмечены невысокие показатели суммарного химического загрязнения почв ТМ (Zc). Оценка степени загрязнения почв ТМ по шкале загрязнения [13] показала, что 61% исследованных площадок Благовещенска имеют, в основном, допустимый уровень загрязнения (Zc < 1 б). Умеренно опасный уровень загрязнения (Zc = 16–32) выявлен на

5 пробных площадках, расположенных в промышленной и транспортной зонах и Первомайском парке, где источниками загрязнения почв ТМ являются расположенные рядом нефтебаза и котельные. Опасный уровень загрязнения почв ТМ (Zc = 32–128) отмечен в индустриоземах спичфабрики (Zc = 45) и силикатного завода (Zc = 67).

Все исследованные пробные площадки Свободного имеют допустимый уровень загрязнения почвы ТМ, в Белогорске на трех участках отмечен умеренно опасный уровень загрязнения. Возможными источниками загрязнения могут быть расположенные рядом автодороги и котельные.

Обобщая данные по накоплению ТМ в почвах, можно отметить, что урбаногемаи трех городов имеют повышенное содержание ТМ по сравнению с фоном. Повышенное содержание Cu, Zn, Ni и Co в урбаногемах Свободного по сравнению с Белогорском, возможно, связано с техногенным поступлением ТМ, худшим состоянием автодорог или составом почвообразующих пород. Урбаногемаи Благовещенска характеризуются более высоким содержанием ТМ, чем Белогорска и Свободного, что свидетельствует о более высокой степени загрязнения его атмосферы ТМ в связи с повышенной техногенной нагрузкой, обусловленной большей насыщенностью города промышленными предприятиями и транспортными средствами.

ФОРМЫ СОЕДИНЕНИЙ ТМ В ПОЧВАХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Валовое содержание характеризует общее содержание ТМ в почвах, но наибольшую экологическую опасность представляют подвижные формы ТМ. Подвижность химических элементов в почвах подразумевает их способность переходить из твердых фаз почвы в почвенный раствор под воздействием определенных экстрагирующих реагентов [7].

Были определены следующие фракции соединений ТМ в почвах.

1. Водорастворимая фракция ТМ считается более агрессивной, характеризует степень подвижности элементов в почве, их миграционную активность в ионной форме и часто используется для оценки возможных масштабов загрязнения гидросферы. Для животных и растений наиболее доступны химические элементы именно в водорастворимой форме [14]. На долю этой фракции в урбаногемах обследуемых городов приходится до 1.8% от валового количества Cu, Zn, Cr, Mn, Ni, Co и Cd. Доля водорастворимого Pb на отдельных площадках промышленной зоны Благовещенска достигает 3.0% от его валового содержания, а в Свободном – 3.8%. В урбаногемах Благовещенска в водорастворимую фракцию (в мг/кг) боль-

ше переходят (в среднем) Ni и Co, Свободного – Pb, Cu и Cr, а Белогорска – Mn.

II. Специфически сорбированная фракция ТМ. В данной фракции в урбаногемах трех городов в 10–100 раз больше подвижных форм ТМ, чем в водорастворимой, а Mn – до 400 раз, что делает загрязнение почв этими элементами наиболее опасным. Наибольшей подвижностью в ацетатно-аммонийной вытяжке отличались Zn и Mn, наименьшей – Cr и Cu. Для Mn и Zn зафиксировано превышение ПДК на двух площадках Благовещенска, для Pb – на шести, в основном, это площадки промышленной и транспортной зон.

В урбаногемах Свободного отмечено незначительное превышение ПДК для данной фракции по Cu и Pb. В урбаногемах Белогорска превышение ПДК для ТМ в специфически сорбированной фракции не зафиксировано. Таким образом, наибольшая доля ТМ в данной фракции выявлена для Zn, Cd, Pb и Mn, что может приводить к накоплению этих металлов в растениях, а наименьшая – для Cu и Cr.

III. Фракция ТМ, связанная с аморфными оксидами и гидроксидами Fe и Mn, характеризует содержание потенциально-подвижных форм ТМ. В урбаногемах Благовещенска среди элементов в этой фракции первое место занимает Mn, его концентрация достигает 660 мг/кг, что составляет 80% от его валового количества. Следующий по содержанию в данной фракции – Zn, концентрация которого достигает 74 мг/кг (60% от валового). Подобная картина наблюдается и для почв Свободного и Белогорска, где доля соединений Mn в III фракции достигает 80% от валового содержания в Белогорске и 92% – в Свободном. Доля Zn на некоторых площадках Белогорска доходит до 74% и до 79% – в Свободном, а доля Co – до 72% от его валового содержания.

Концентрации соединений Zn, Cr, Ni, Co, Cd в III фракции преобладают в урбаногемах Свободного, превышая их содержания в урбаногемах Благовещенска и Белогорска до 3 раз. Возможно, это связано с переувлажнением почв Свободного во время пробоотбора, когда количество осадков было почти в 2 раза больше, чем в Благовещенске и Белогорске.

При переувлажнении происходит частичное разрушение почвенных конкреций и восстановление Fe^{3+} до Fe^{2+} , соединения которого более подвижны, а вместе с ними освобождаются и соединения других ТМ, соосажденных с оксидами и гидроксидами Fe и Mn [8]. Таким образом, в урбаногемах исследованных городов наиболее преобладающими в III фракции являются Mn, Zn, Co, Pb и Ni, а наименее – Cr и Cu.

IV. Фракция ТМ, связанных с органическим веществом почв. Для IV фракции в урбаногемах трех городов характерно более высокое содержание

Cu и Pb. Их доля достигает 42% и 27% от валового количества, соответственно. Средние концентрации Cu, Cr, Ni и Co в данной фракции больше в урбаногемах Свободного. В урбаногемах Благовещенска только содержание Pb в IV фракции больше в 2.5 раза, чем в других городах.

Наибольшее сродство ТМ с данной фракцией почв характерно для Cu, Pb, Zn и Ni. Наименее связаны с органическим веществом почвы Mn и Cr.

V. Остаточная фракция ТМ. В остаточной фракции урбаногемов обследуемых городов больше удерживается Cr, в городах Благовещенск и Белогорск – Cu, до 98% от валового содержания, в то время как в Свободном доля Cu в этой фракции составляет только 65% от валового количества. В урбаногемах Благовещенска содержание Pb и Cd в инертной фракции достигает 90% – в селитебной зоне и 75% – в промышленной. Доля Ni, Co и Zn в остаточной фракции урбаногемов трех городов варьирует от 1.5 до 90% в зависимости от типа почв и характера загрязнения, доля Mn не более 40%.

Доля ТМ, прочно закрепленных в кристаллических решетках минералов почвы, убывает в ряду: Cr > Cu > Cd > Ni > Pb > Co > Zn > Mn.

Техногенное загрязнение урбаногемов способствует увеличению доли подвижных форм ТМ; по сравнению с фоновыми территориями, снижается доля ТМ в остаточной фракции и увеличивается их содержание в специфически сорбированной фракции, во фракциях, связанных с аморфными соединениями Fe и Mn и органическим веществом. Это объясняется тем, что ТМ, попадая в почву, взаимодействуют с глинистыми минералами, гидроксидами и оксидами железа и марганца, органическим веществом, меняя свою подвижность.

Для оценки потенциальной подвижности тяжелых металлов Д.В. Власовым [4] был предложен коэффициент подвижности *MFp* и следующие критерии риска включения ТМ в пищевые цепи: риск отсутствует – менее 5%, низкий – 5–25%, средний – 25–50%, высокий – 50–75%, очень высокий – более 75%.

В почвах трех городов наибольшую потенциальную опасность среди изученных элементов представляют Zn, Cd и Mn, *MFp* которых соответствует высокому уровню опасности (табл. 2). Средний риск включения в пищевые цепи характерен для Pb, Ni, Co, в Свободном добавляется Cu.

Кислоторастворимые формы ТМ. Для оценки уровня техногенного загрязнения городских почв было использовано отношение содержания ТМ в вытяжке 1 М HCl к их валовому содержанию, выраженный в процентах [3].

В урбаногемах трех городов содержится 9–72% кислоторастворимых форм Cu; 5.8–85% – Zn; 14–73% – Mn; 0.3–27% – Cr; 6–43% – Ni; 5–54% – Co;

Таблица 2. Потенциальная подвижность ТМ в почвах городов, %

Города	Cu	Zn	Mn	Cr	Ni	Co	Pb	Cd
Благовещенск	16	58	64	11	34	41	40	70
Белогорск	19	53	67	6	27	48	43	—
Свободный	45	56	73	14	44	50	37	36

9-74% – Pb; 10-66% – Cd, что в 3–10 раз больше фоновых показателей. Повышенная доля ТМ, экстрагируемых 1 М HCl, указывает на техногенность происхождения элемента.

Наибольший вклад техногенной составляющей в валовое содержание ТМ в урботехнозомах в Благовещенске вносит Zn, тогда как в Белогорске и Свободным – Pb, а наименьший во всех городах – Cr (табл. 3).

Доля кислоторастворимых форм ТМ, от валового содержания, для разных элементов различна и убывает в ряду: Благовещенск: Zn > Pb > Mn > Cu > Cd > Co > Ni > Cr; города Белогорск и Свободный: Pb > Mn > Cu > Zn > Co > Ni > Cr > Cd.

Таким образом, Zn, Pb, Mn, Cu – основные техногенные загрязнители урбаноземов исследуемых городов. Для всех исследуемых элементов, кроме хрома, наблюдается связь между валовым содержанием ТМ и их кислоторастворимыми формами, что подтверждается корреляционным анализом (табл. 4).

Максимальный процент кислоторастворимых форм ТМ наблюдается на тех же площадках городов, где отмечено повышенное валовое содержание ТМ, – это промышленные зоны и районы с наибольшим транспортным потоком.

На фоновых участках трех городов ТМ находятся в прочнофиксированном состоянии, поэтому солянокислая вытяжка извлекала, в среднем, до 15% элементов. Доля кислоторастворимых форм ТМ на фоновых участках убывает в ряду: Cu > Mn > Zn > Ni ~ Co.

Соединения ТМ, поступившие в почву из техногенных источников, постепенно трансформируются и перераспределяются между теми почвенными компонентами, взаимодействие с которыми наиболее характерно для данного ТМ [10]. Количество ТМ, извлекаемых из почвы при последовательном экстрагировании и с помощью 1 М соляной кислоты, показало преимущественные пути перехода ТМ из состава почвенных компонентов в солянокислую вытяжку. На рис. 1 показаны зависимости, выявленные для почв Благовещенска.

С возрастанием техногенного привноса ТМ, которое определяется содержанием кислоторастворимой формы, происходит аккумуляция Mn в наибольшей степени во фракции, связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn (рис. 1).

Cu в наибольшей степени переходит в солянокислую вытяжку из состава органических почвенных компонентов. Для Cu наблюдается связь между ее содержанием в 1 М HCl вытяжке с содержанием во фракции, связанной с органическим веществом почв (см. рис. 1). В промышленной зоне Благовещенска доля подвижных соединений Cu в данной фракции достигает на отдельных площадках 42% от ее валового содержания.

Cr, Co, Ni образуют устойчивые соединения как с органической, так и с минеральной частью почвы, что выразилось в относительно высокой процентной доле фракций, связанных с органическим веществом и гидроксидами Fe и Mn (см. рис. 1). При увеличении содержания кислоторастворимых форм Cr, Co, Ni в почвах увеличивается содержание этих элементов во фракциях, связанных с органическим веществом и с железистыми минералами.

Для Zn проявилась связь между его содержанием в кислотной вытяжке и во фракции, связанной с гидроксидами Fe и Mn (см. рис. 1). Техногенное воздействие в урбоэкосистеме способствует увеличению накопления Zn и в

Таблица 3. Кислоторастворимые формы ТМ в урбаноземах городов, % от валового содержания

Элемент	Благовещенск (n = 66)	Белогорск (n = 20)	Свободный (n = 20)
Cu	(8.9–58.3) 29.4 ± 12	(15.2–72.2) 36.0 ± 19	(22.0–54.0) 36.9 ± 10
Zn	(11.3–85.4) 53.7 ± 20	(13.0–48.1) 31.0 ± 13	(5.8–47.4) 26.5 ± 14
Mn	(14.5–73.5) 42.6 ± 12	(25.1–56.9) 36.2 ± 15	(25.1–62.8) 38.9 ± 13
Cr	(0.22–8.6) 3.3 ± 1.4	(1.3–18.0) 11.4 ± 6.5	(9.9–27.7) 16.3 ± 6.1
Ni	(8.2–43.0) 20.5 ± 9.0	(8.6–29.3) 20.2 ± 8.1	(6.8–30.1) 17.6 ± 10
Co	(5.0–53.7) 25.3 ± 14	(13.8–30.0) 24.0 ± 6.0	(5.0–43.0) 22.9 ± 14
Pb	(6.0–81.3) 45.9 ± 17	(9.9–72.7) 44.8 ± 20	(36.8–74.1) 55.0 ± 15
Cd	(<1.0–66.0) 29.0 ± 10	<1.0/<1.0	(<1.0–33.3) 15.9 ± 8.2

Примечания: полужирным шрифтом выделено среднее значение; в скобках – диапазон концентраций ТМ; ± – стандартные отклонения от среднего арифметического; n – число проб.

Таблица 4. Корреляционная зависимость между валовым содержанием ТМ в почвах Благовещенска и содержанием кислоторастворимых форм

ТМ в почве валовое	Кислоторастворимые формы ТМ (n = 66)							
	Cu	Zn	Mn	Cr	Ni	Co	Pb	Cd
Cu	0.86	0.06	0.30	0.18	0.38	0.21	0.81	-0.39
Zn	-0.02	0.99	-0.13	-0.02	-0.20	-0.10	0.50	-0.82
Mn	0.35	-0.01	0.91	0.08	0.84	0.80	0.19	-0.13
Cr	0.66	0.29	0.41	0.10	0.53	0.37	0.77	-0.63
Ni	0.28	-0.05	0.78	0.09	0.84	0.87	0.04	0.11
Co	0.42	0.06	0.89	0.01	0.87	0.85	0.24	-0.16
Pb	0.36	0.84	-0.09	0.21	-0.08	-0.14	0.84	-0.84
Cd	-0.15	-0.73	-0.08	0.32	0.01	-0.25	-0.56	0.89

Примечание: жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции.

специфически сорбированной фракции, что представляет экологическую опасность. В специфически сорбированной фракции доля Zn в урбаноноземах транспортной зоны Благовещенска достигает 20% от валового количества. Можно предположить, что кислоторастворимые соединения элемента при их трансформации в почве являются источником элементов, переходящих в непрочно связанные с почвой фракции.

С ростом техногенной нагрузки Pb активно взаимодействует с органическим веществом почвы и железистыми минералами. С увеличением концентрации Pb увеличилась его доля и в специфически сорбированной фракции, которая в транспортной зоне Благовещенска достигает 22% от валового содержания.

Cd характеризуется высокой подвижностью и с увеличением техногенного привноса Cd возрастает его содержание в специфически сорбированной фракции и связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn (см. рис. 1). Так, в ацетатно-аммонийную вытяжку в промышленной и транспортной зонах Благовещенска переходит до 23% Cd от валового содержания, а в оксидную – до 47%.

Таким образом, при поступлении ТМ из техногенных источников Cu закрепляется в почве преимущественно за счет взаимодействия с органическим веществом; Mn концентрируется в оксидной фракции; Cr, Co, Ni и Pb взаимодействуют как с органическим веществом, так и с гидроксидами Fe и Mn. Cd и Zn при высоких уровнях загрязнения закрепляются в почве как за счет специфической сорбции, так и за счет взаимодействия с гидроксидами Fe и Mn.

Было проведено сравнение количества ТМ, извлекаемых реагентами в подвижные фракции (I–IV), с количеством ТМ, извлекаемых 1 М соляной кислотой. Было выявлено, что количество Pb, экстрагируемое при фракционировании в почвах Благовещенска, примерно равно количе-

ству, переходящему в 1 М солянокислую вытяжку (табл. 5).

Количество Cu и Zn, переходящее в 1 М солянокислую вытяжку из почв Благовещенска, больше извлекаемых в подвижные фракции. В почвах Белогорска и Свободного солянокислой вытяжкой больше извлекается Pb, в Белогорске добавляется Cu. Для Mn, Cr, Ni, Co, Cd наблюдали обратную зависимость – при фракционировании больше извлекается этих элементов, чем переходит в солянокислую вытяжку. Превышение содержания соединений Cu, Pb и Zn в солянокислой вытяжке свидетельствует об их техногенном происхождении. Следовательно, при техногенном загрязнении почв ТМ использование 1 М солянокислого раствора позволяет извлекать из почв техногенные соединения и продукты их трансформации.

Таким образом, анализ фракционного состава ТМ выявил механизмы их закрепления в почвенных компонентах исследуемых городов. Зная механизмы закрепления ТМ в почве, можно ограничить их миграцию и доступность растениям

Таблица 5. Количество ТМ, извлеченных в I–IV фракциях и 1М соляной кислотой, мг/кг

Фракции	Cu	Zn	Mn	Cr	Ni	Co	Pb	Cd
Благовещенск								
I–IV фракции	3.63	34.5	343	4.50	7.05	5.90	16.8	0.38
1 М HCl	6.06	38.0	243	1.34	4.60	3.10	16.7	0.24
Белогорск								
I–IV фракции	3.80	35.0	361	5.70	5.05	3.20	18.0	–
1 М HCl	15.2	19.3	183	3.39	3.50	1.20	21.0	–
Свободный								
I–IV фракции	10.3	42.0	398	6.64	10.4	7.10	16.9	0.34
1 М HCl	8.06	24.5	176	3.30	3.30	2.70	23.8	0.17

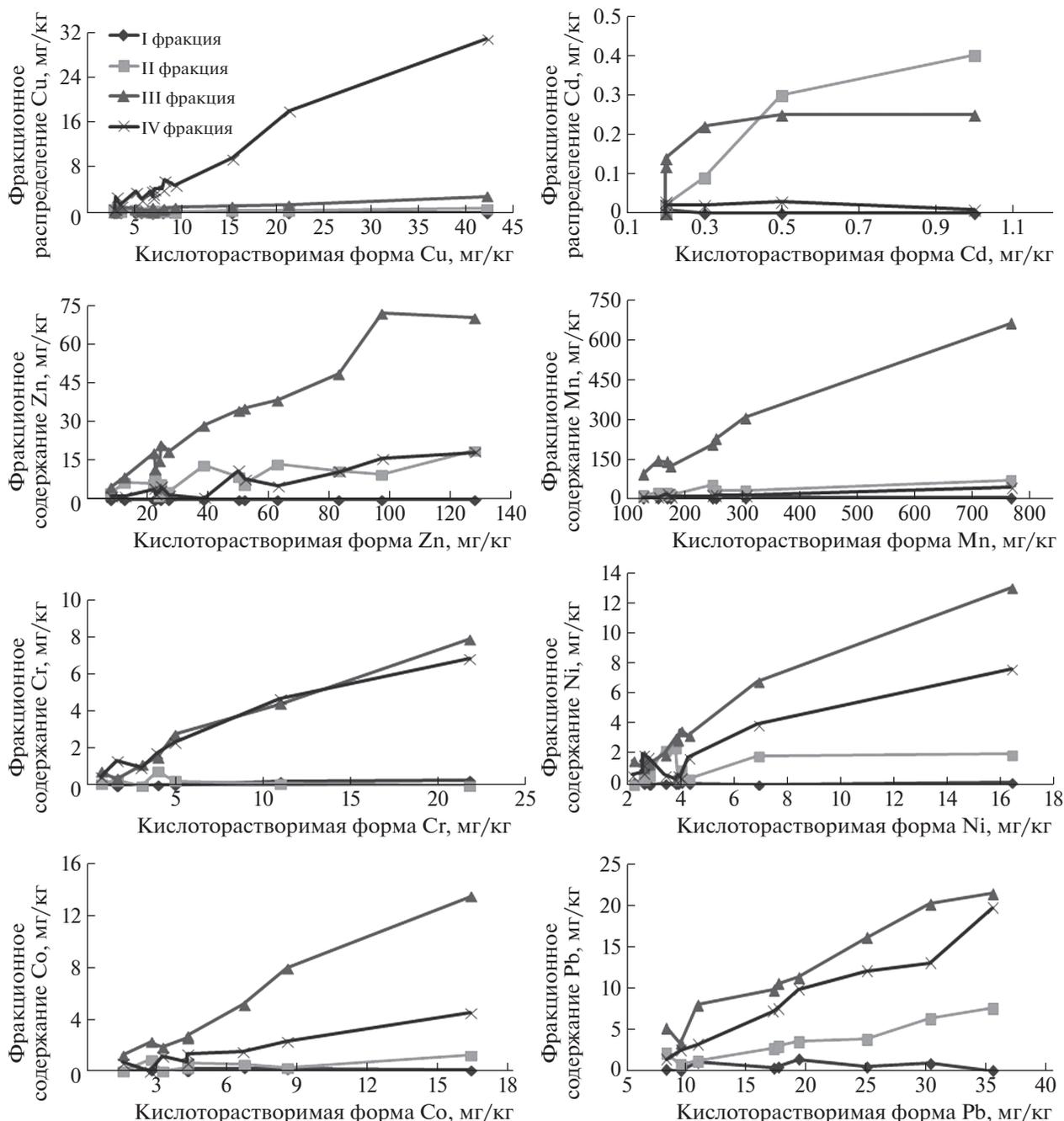


Рис. 1. Зависимость между содержаниями ТМ в экстракте 1М соляной кислоты и их содержаниями во фракциях: I – водорастворимой; II – специфически сорбированной, III – связанной с гидроксидами Fe и Mn, IV – связанной с органическим веществом.

при формировании почвогрунтов при озеленении городов. Например, для связывания избыточного количества мобильных форм ТМ, закрепленных в большей степени во фракции, связанной с органическим веществом почв (Cu, Cr, Pb, Ni, Co), можно применять гуминовые препараты. Повышенное содержание элементов, преобладающих во фракции, связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn, (Zn, Mn, Cd) можно сни-

зить известкованием или внесением цеолитов. Глинистые минералы оказывают существенное влияние в закреплении соединений ТМ в почвах, поэтому при формировании почвогрунтов целесообразно внесение глины. Это особенно актуально для рекреационных зон исследованных городов, которые по экологическому состоянию почвенно-растительного покрова не соответствуют требованиям, предъявляемым к зонам отдыха.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что основными загрязнителями почв трех городов, относительно фона, являются соединения Pb, Zn, Cu и Mn. Наибольший вклад техногенной составляющей, по содержанию кислоторастворимых форм, в валовое содержание ТМ в урбанизированных почвах Благовещенска отмечен для Zn, Pb и Mn, а Белогорска и Свободного – для Pb и Cu.

2. Анализ фракционного распределения ТМ показал, что в урбанизированных почвах поступающие в почву металлы закрепляются, в основном, в следующих фракциях:

Cu – во фракции, связанной с органическим веществом;

Mn – связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn;

Zn и Cd – связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn и специфически сорбированной;

Ni, Co, Pb и Cr – связанной с оксидами и гидроксидами Fe и Mn и органическим веществом почв.

С возрастанием техногенной нагрузки уменьшается содержание элементов в остаточной фракции и увеличивается доля подвижных форм ТМ.

3. В почвах трех городов, по сравнению с фоновой почвой, увеличилась потенциальная подвижность тяжелых металлов. Наибольшую опасность среди изученных элементов представляют Zn, Cd и Mn, коэффициент подвижности которых соответствует высокому уровню опасности. Средний риск включения в пищевые цепи отмечен для Pb, Ni, Co.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амурская область // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16 № 1 (4). С. 1055–1058.
2. *Бородин Д.В.* Фракционный состав цинка в почвах восточной Москвы // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Безопасный город: матер. XII науч.-практ. конф., посв. 30-летию аварии на Чернобыльской АЭС. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2016. С. 91–99.
3. *Водяницкий Ю.Н.* Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах. М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2009. 184 с.
4. *Кабата-Пендиас А.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
5. *Ладонин Д.В.* Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. 2002. № 6. С. 682–692.
6. *Плеханова И.О.* Влияние условий увлажнения на фракционный состав соединений тяжелых металлов в агродерново-подзолистых почвах, загрязненных осадком сточных вод // Почвоведение. 2012. № 7. С. 735–743.
7. *Павлова Л.М., Радомская В.И., Юсупов Д.В.* Высокотоксичные элементы в почвенном покрове на территории г. Благовещенск // Экология и промышленность России. 2015. № 5. С. 50–55.
8. *Пляскина О.В., Ладонин Д.В.* Загрязнение городских почв тяжелыми металлами // Почвоведение. 2009. № 7. С. 877–885.
9. *Радомская В.И., Радомский С.М., Куимова Н.Г.* Оценка загрязнения почвенного покрова г. Благовещенск // Вестник ДВО РАН. 2008. № 3. С. 37–43.
10. *Радомская В.И., Бородина Н.А.* Оценка антропогенного загрязнения почвы урбанизированной территории на примере города Благовещенска // Геоэкология. 2019. № 6. С. 79–93.
11. *Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С. и др.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
12. *Сысо А.И.* Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 277 с.
13. *Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M.* Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // Anal. Chem. 1979. № 51. P. 844–851.

INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC POLLUTION ON MOBILITY OF HEAVY METALS IN SOILS OF LOW-INDUSTRIAL CITIES IN AMUR REGION

N. A. Borodina^{a,##} and V. I. Radomskaya^{a,##}

^a Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Relochnyi per., 1, Blagoveshchensk, 675000 Russia

[#]E-mail: Borodina53@yandex.ru

^{##}E-mail: Radomskaya@asnet.ru

Accumulation and distribution of heavy metals (Cu, Zn, Mn, Cr, Ni, Co, Pb, and Cd) have been studied in soils of the largest cities in the Amur region, i.e., Blagoveshchensk, Belogorsk and Svobodny. It was found that Pb, Zn, Cu and Mn are the main pollutants of urban soils in these three cities. Mobility of heavy metals

in urban soils was estimated comprehensively proceeding from the fractional distribution of heavy-metal compounds. The metals coming to urban soils are fixed mainly in the following fractions: Cu – in the fraction associated with organic matter; Mn – in that associated with Fe and Mn oxides and hydroxides; Zn and Cd – in the specifically adsorbed fraction associated with Fe and Mn oxides and hydroxides; Ni, Co, Pb and Cr – associated with Fe and Mn oxides and hydroxides, as well as soil organic matter. The content of elements in the residual fraction decreases, and the proportion of HM mobile forms (oxides associated with organic matter and specifically adsorbed) rise with an increase in technogenic load. The excess of Cu, Pb and Zn acid-soluble compounds' content over their total amount derived by sequential extraction indicates that town soils had been contaminated by HM compounds of technogenic origin. The largest contribution of technogenic component, in terms of acid-soluble forms' content, into the total HMs' content of Blagoveshchensk urban soils was noted for Zn, Pb and Mn, in Belogorsk and Svobodny – for Pb and Cu. In comparison with the background area, the potential mobility of heavy metals increases in urban soils. Among the studied elements, Zn, Cd and Mn, which potential mobility corresponds to a high level of risk, pose the greatest danger. The moderate risk of inclusion into food chains is typical for Pb, Ni, Co.

Keywords: heavy metals, mobility, fractional composition, urban soils, technogenic pollution

REFERENCES

1. *Amurstat, territorial'nyi organ federal'noi sluzhby*. [Amurstat, a territorial body of the federal service]. URL: <http://amurstat.gks.ru>.
2. Borodina, N.A. *Tekhnogennoe zagryaznenie tyazhelymi metallami urbanizirovannykh pochv Amurskoi oblasti* [Technogenic pollution of urbanized soils in the Amur region by heavy metals]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2018, no. 2, pp. 43–49. (in Russian).
3. Borodina, N.A. *Otsenka tekhnogennoho zagryazneniya po sodержaniyu kislotorastvorimykh form tyazhelykh metallov v urbanizirovannykh pochvakh goroda Svobodnogo (Amurskaya oblast')* [Assessment of technogenic pollution by the content of acid-soluble forms of heavy metals in urbanized soils of the city of Svobodny (Amur region)]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, vol. 16, no 1(4), pp. 1055–1058. (in Russian).
4. Vlasov, D.V. *Fraktsionnyi sostav tsinka v pochvakh vostochnoi Moskvy* [Fractional composition of zinc in the soils of Eastern Moscow]. *Kompleksnyye problemy tekhnosfernoi bezopasnosti. Bezopasnyi gorod: materialy XII nauch.-prakt. konf., posvyashchennoi 30-letiyu avarii na Chernobyl'skoi AES*. [Complex problems of technosphere safety. Safe City. Materials of the XII Scientific and Practical Conference dedicated to the 30th anniversary of the Chernobyl AES]. *Voronezh, "Voronezh State Technical University"*, 2016, pp. 91–99. (in Russian).
5. Vodyanitskii, Yu.N. *Tyazhelye i sverkhlyazhelye metally i metalloidy v zagryaznennykh pochvakh*. [Heavy and super heavy metals and metalloids in polluted soils]. Moscow, Dokuchaev Soil Science, 2009, 184 p. (in Russian).
6. Kabata-Pendias, A. *Mikroelementy v pochvakh i rastenyakh* [Microelements in soils and plants]. Moscow, Mir, 1989, 439 p. (in Russian).
7. Ladonin, D.V. *Soedineniya tyazhelykh metallov v pochvakh – problemy i metody izucheniya* [Heavy metal compounds in soils: problems and methods of study]. *Pochvovedenie*, 2002, no. 6, pp. 682–692. (in Russian)
8. Plekhanova, I.O. *Vliyaniye uslovii uvlazhneniya na fraktsionnyi sostav soedinenii tyazhelykh metallov v agroder-novo-podzolistykh pochvakh, zagryaznennykh osadkom stochnykh vod*. [Influence of humidification conditions on the fractional composition of heavy metal compounds in agro-soddy-podzolic soils contaminated with sewage sludge]. *Pochvovedenie*, 2012, no 7, pp. 735–743. (in Russian)
9. Pavlova, L.M., Radomskaya, V.I., Yusupov, D.V. *Vysokotoksichnyye elementy v pochvennom pokrove na territorii g. Blagoveshchensk* [High-toxic elements in the soil cover in the territory of Blagoveshchensk]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2015, no. 5, pp. 50–55. (in Russian)
10. Plyaskina, O.V., Ladonin, D.V. *Zagryaznenie gorodskikh pochv tyazhelymi metallami* [Heavy metal pollution of urban soils]. *Pochvovedenie*, 2009, no. 7, pp. 877–885. (in Russian).
11. Radomskaya, V.I., Radomskii, S.M., Kuimova, N.G. *Otsenka zagryazneniya pochvennogo pokrova g. Blagoveshchensk* [Assessment of soil cover pollution in Blagoveshchensk town]. *Vestnik DVO RAS*, 2008, no. 3, pp. 37–43. (in Russian).
12. Radomskaya, V.I., Borodina, N.A. *Otsenka antropogennogo zagryazneniya pochvy urbanizirovannoi territorii na primere goroda Blagoveshchenska* [Assessment of anthropogenic soil pollution of urbanized territory by the example of Blagoveshchensk town]. *Geoekologiya*, 2019, no. 6, pp. 79–93. (in Russian).
13. Saet, Yu.E., Revich, B.A., Yanin, E.P., Smirnova, et al. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, Nedra, 1990, 335 p. (in Russian).
14. Syso, A.I. *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoi Sibiri* [Regularities of distribution of chemical elements in soil-forming rocks and soils of Western Siberia]. Novosibirsk, SB RAS Publishing House, 2007, 277 p. (in Russian).
15. Tessier, A., Campbell, P.G.C., Bisson, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem*, 1979, no 51, pp. 844–851.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА
ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 625.731.3

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ
ДОРОГ НА ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОСИСТЕМ МОРСКИХ ТЕРРАС

© 2021 г. С. В. Рыбальченко^{1,*}, А. С. Оганезов^{2,**}

¹ ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН,
ул. Максима Горького, 25, г. Южно-Сахалинск, 693000 Россия

² ФГБОУ ВУ Сахалинский государственный университет,
пр. Коммунистический, 33, г. Южно-Сахалинск, 693000 Россия

*E-mail: rybalchenko_sv@mail.ru

**E-mail: artusur@mail.ru

Поступила в редакцию 23.12.2020 г.

После доработки 29.03.2021 г.

Принята к публикации 12.04.2021 г.

Рассмотрено антропогенное воздействие на компоненты геосистемы морских террас (преобразование рельефа местности, сведение растительности, воздействие на гидрологический, гидрогеологический режим территории и т.д.) при строительстве автомобильных дорог. Наибольшую угрозу для конструктивной целостности автомобильных дорог на морских террасах представляют опасные экзогенные геодинамические процессы (сели, оползни, эрозия), активизация которых происходит вследствие антропогенного воздействия. Значительную роль в данном процессе играют ошибки на стадии изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации транспортных магистралей в части организации системы водоотведения. Среди дефектов систем водоотведения выделено две группы: отсутствие систем водоотведения и конструктивные дефекты водосборных и водосбросных сооружений. На основе регулярных полевых наблюдений за динамикой опасных экзогенных процессов на морских террасах и анализа фондовых данных установлено влияние дефектов систем водоотведения на компоненты геосистем морских террас и обратный негативный эффект, представляющий угрозу конструктивной целостности автомобильных дорог.

Ключевые слова: дефекты водоотведения, опасные экзогенные процессы, морская терраса, антропогенное воздействие, геосистема морских террас, компоненты геосистемы

DOI: 10.31857/S0869780921040093

ВВЕДЕНИЕ

Урбанизированные территории морских побережий зачастую представляются наиболее удобными участками для трассировки транспортных магистралей, поскольку позволяют сократить капитальные вложения на стадии строительства и создать развитую инфраструктуру в прибрежной зоне [15]. Стоит отметить, что в связи с целым рядом особенностей территорий морских побережий и активным развитием опасных экзогенных процессов (селей, оползней, эрозии, паводков и др.) эксплуатационные характеристики транспортных магистралей могут существенно снижаться, и возникает угроза их конструктивной целостности и безопасности дорожного движения.

В случае повреждения или разрушения покрытия и земляного полотна, многочасовое отсутствие транспортного сообщения может привести к возникновению различных чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС) локального характера или

крупного ЧС регионального масштаба. Так в июне 2017 г. в Магаданской области был введен режим ЧС в связи с разрушением автодороги по ул. Портовая. Данная транспортная магистраль соединяет г. Магадан с Магаданским морским торговым портом, через который осуществляется до 90% всего грузооборота области. Опасные экзогенные процессы активизировались на небольшом участке автодороги еще в 2013 г. [16]. Из-за отсутствия превентивных мер по организации водоотведения, берегоукреплению и укреплению склона морской террасы развитие склоновых селей и эрозии на участке автодороги протяженностью 300 м привело к возникновению ЧС регионального масштаба. Стоимость реконструкции подобных аварийных участков автомобильных дорог может в 5–10 раз превышать стоимость строительства новой автодороги, в том числе с инженерной защитой территории.

При реализации проектов по строительству автомобильных дорог данный линейный объект и

его конструктивные элементы рассматриваются как комплекс инженерных сооружений, расположенных в границах полосы отвода с определенными природными условиями. Фактически полоса отвода объекта приурочена к отдельным геоморфологическим единицам (например, морская терраса, долина реки, горный склон и т.д.), размеры которых значительно превышают площадь застройки, отведенной под объект. Геоморфологические единицы представляют собой локальные геосистемы, включающие в себя различные компоненты, прямые и обратные связи между ними и процессы обмена веществом и энергией.

Морские террасы, как и все локальные геосистемы являются открытыми системами, которые значительно подвержены внешним воздействиям, что приводит к их активному развитию. Строительство автомобильных дорог на морских террасах оказывает существенное антропогенное воздействие на компоненты геосистемы морских террас в ходе преобразования рельефа местности, сведения растительности, воздействия на гидрологический, гидрогеологический режим территории и т.д.

Серьезную угрозу для автомобильных дорог на морских террасах представляют денудационные, эрозионные, реологические и селевые процессы в теле земляного полотна или в непосредственной близости от него. Активизация опасных водно-гравитационных и флювиальных процессов происходит в связи с изменением гидрологического режима территории при строительстве автомобильных дорог. Решающую роль в изменении естественного равновесия гидрологического режима территории зачастую играют дефекты систем водоотведения автомобильных дорог. К сожалению, данное негативное воздействие имеет пролонгированный эффект и может быть выявлено только в процессе эксплуатации в течение нескольких лет.

Цель данного исследования – оценка влияния дефектов систем водоотведения автомобильных дорог на изменение геосистем морских террас, представляющее угрозу конструктивной целостности автомобильных дорог и безопасности дорожного движения.

Для оценки влияния дефектов систем водоотведения необходимо определить особенности геосистем морских террас, влияющие на конструктивную целостность автомобильных дорог, систематизировать дефекты водоотведения автомобильных дорог, установить причину их возникновения и механизм воздействия на компоненты геосистем, оценить развитие геосистем морских террас при данном антропогенном воздействии и вероятный обратный негативный эффект.

В основу настоящей работы положены результаты многолетних полевых исследований влияния автомобильных дорог на геосистемы террас региональной береговой системы Охотского моря, проводившиеся авторами в период с 2008 по 2020 гг.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОСИСТЕМ МОРСКИХ ТЕРРАС о. САХАЛИН

Локальные геосистемы морских террас являются элементом более крупной региональной береговой геосистемы. Помимо отдельных геоморфологических единиц, расположенных на границе вода–суша, региональная береговая геосистема включает в себя зону литорали и прилегающей акватории, подводный рельеф, а также обширную зону побережья, связанную с морем процессами переноса вещества и энергии. Ширина береговой геосистемы может достигать нескольких десятков километров.

В связи со значительными масштабами региональной береговой геосистемы, строительство автомобильных дорог на морских террасах оказывает воздействие только на компоненты локальной геосистемы морских террас.

Территория о. Сахалин занимает островное положение в переходной полосе от материка Евразии к Тихому океану в зоне действия муссонной циркуляции умеренных широт. Годовое количество осадков на морском побережье колеблется в пределах 800–1100 мм. Осадки выпадают неравномерно, основное количество приходится на вторую половину лета и начало осени (65–70% годовой нормы) [6]. Такое большое количество осадков в этот период обусловлено прохождением циклонов и тайфунов, приносящих ливневые дожди, в течение которых за несколько суток может выпасть больше месячной нормы осадков. Так в августе 1981 г. при прохождении тайфунов “Оджин” и “Филлис” общее количество осадков на гидрометеорологической станции (ГМС) “Холмск” составило 203 мм при среднемноголетней их сумме за август 100 мм; на ГМС “Невельск” 211 мм при среднемноголетней сумме осадков за август 102 мм; на ГМС “Макаров” 215 мм при месячной норме 99 мм; на ГМС “Корсаков” 251 мм при месячной норме 91 мм [11]. В течение года над Сахалином проходит в среднем около ста циклонов, которые способствуют активному увлажнению территории и активизации экзогенных геодинамических процессов.

Муссонный климат и активная циклоническая деятельность характерны для территории всего побережья Охотского моря, в том числе территории Магаданской области, Курильских островов и Камчатки.

Среди компонентов геосистем морских террас о. Сахалин, которые могут оказывать влияние на конструктивную целостность автомобильных дорог, стоит выделить рельеф, геологическую среду и гидрологический режим, обусловленный климатическими особенностями территории.

Высота морских террас о. Сахалин может достигать 200 м, а высота уступа от подножия до бровки несколько десятков метров. Вне зависимости от расположения транспортных магистралей (у подножия или на поверхности морской террасы) высокая энергия рельефа приводит к активному развитию склоновых процессов и увеличению их динамических характеристик. Преобразование рельефа морских террас в ходе строительства автомобильной дороги может значительно увеличивать потенциальную энергию геодинамических процессов в связи с перемещением и складированием большого объема земляных масс.

Геологическая среда геосистем морских террас и ее особенности обусловлены механизмом формирования и строением морских террас. В зависимости от строения морские террасы подразделяют на аккумулятивные (полностью сложенные прибрежно-морскими отложениями), цокольные (имеющие коренной цоколь, перекрытый морскими отложениями) и абразионные уступы (сложенные только коренными породами) [17].

Морские берега, представленные преимущественно аккумулятивными и аккумулятивно-денудационными морскими террасами. Грунты, слагающие морские террасы, представлены преимущественно рыхлыми четвертичными отложениями (пески, галечники, супеси и т.д.), а также скальными и полускальными породами верхне-мелового, палеогенового и неогенового возрастов, которые представлены аргиллитами, песчаниками, алевролитами [4]. Горные породы сильно дислоцированы и характеризуются низкими фильтрационными свойствами, хорошей размокаемостью, низким сцеплением и углом внутреннего трения, что способствует активному вовлечению их в склоновые процессы.

Морские террасы на территории о. Сахалин сильно рассечены различными эрозионными формами рельефа: врезами, оврагами, долинами небольших водотоков. Малые водотоки, в том числе временные, на морских побережьях при их незначительной площади, как правило, обладают большими поперечными и продольными уклонами, невысокой залесенностью, а вмещающие горные породы зачастую отличаются низкой инфильтрацией, что в период ливневых осадков приводит к минимальному времени формирования максимального поверхностного стока и высоким значениям расходов, а также активному формированию флювиальных и водно-гравитационных процессов. Особенности гидрологиче-

ского режима морских террас обусловлены муссонным климатом с интенсивными осадками, геологической средой и рельефом.

ДЕФЕКТЫ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ

Система дорожного водоотведения состоит из ряда сооружений и отдельных конструктивных мероприятий, предназначенных для предотвращения переувлажнения земляного полотна и обеспечения благоприятного режима влажности грунтовых оснований дорожных одежд [18].

Под дефектом системы водоотведения подразумевается отдельное несоответствие ее конструкции по какому-либо параметру, установленному проектом или нормативно-техническим документом (СНиП, ГОСТ и т.д.), которое может приводить к негативным последствиям: повреждению различных элементов автодороги (земляного полотна, дорожной одежды, искусственных дорожных сооружений) и снижению уровня безопасности дорожного движения.

В настоящее время дефекты систем водоотведения включены в общую систему классификации дефектов автомобильных дорог, указанную в Каталоге типичных дефектов содержания конструктивных элементов автомобильных дорог [8], а также в Приложении № 1 к Приказу Минтранса РФ от 8 июня 2012 г. № 163 “Об утверждении Порядка проведения оценки уровня содержания автомобильных дорог общего пользования федерального значения” [14]. Данные нормативные документы предназначены для распознавания и выявления типичных дефектов содержания конструктивных элементов автомобильных дорог путем визуального сличения изображения дефектов с реальными дефектами на дорогах при их обследовании службами ремонта и содержания. Аналогичные системы классификации и распознавания дефектов существуют в зарубежной литературе [20].

В разные годы изучению дефектов автомобильных дорог, в том числе систем водоотведения были посвящены работы А.П. Васильева, Т.А. Гурьева, Б.Ф. Перевозникова, А.А. Ильиной, М.Я. Крицкого и В.Н. Шестакова [3, 5, 7, 9, 12, 13], в которых были освещены вопросы классификации дефектов, повреждений и разрушений автомобильных дорог, причины их возникновения, конструктивные схемы водоотведения и их функциональные особенности, а также характерные недостатки строительства и содержания дорожного водоотвода. Большое внимание в работах зарубежных авторов уделено машинному распознаванию дефектов для автоматизации работы служб эксплуатации автомобильных дорог [19, 21].

В работе авторами принята условная классификация дефектов систем водоотведения на категории: отсутствие организованной системы водо-



Рис. 1. Денудация земляного полотна: а – автодорога Южно–Сахалинск–Оха, 2017 г.; б – автодорога Невельск–Тома-ри–аэропорт Шахтерский, 2007 г.

отведения и конструктивные дефекты, возникшие на стадии проектирования, строительства или эксплуатации.

Отсутствие организованного водоотведения

Организованная система водоотведения условно включает в себя водосборные и водосбросные сооружения.

Водосборные сооружения предназначены для сбора и концентрации поверхностных вод, к ним относятся: боковые каналы (кюветы), водоотводящие каналы, нагорные каналы, прикромочные, дождеприемные и поперечные водосбросные лотки, ливневая канализация, водопропускные сооружения (мосты и трубы), сооружения подземного водоотвода.

Водосбросные сооружения: перепады, гасители энергии, быстротки с водобойными колодцами, рассеивающие трамплины, предназначены для гашения на коротком участке кинетической энергии водного потока до размеров, не угрожающих размыву искусственного водоотводного русла или мест выброса воды на прилегающую территорию.

Стоит отметить, что отсутствие системы водоотведения может относиться как к элементам земляного полотна самой автодороги (покрытие, откосы), так и к прилегающей территории (полоса отвода).

Отсутствие водосборных сооружений имеет негативные последствия:

- застои воды на покрытии,
- временные нерусловые потоки с откосов земляного полотна,
- фильтрационные потоки в теле насыпи,

– опасные экзогенные процессы в теле земляного полотна и полосе отвода (оползни, эрозия, сели, наледи и др.).

Скопление воды на покрытии автодороги и в конструктивных слоях дорожной одежды может значительно снизить их эксплуатационные характеристики и несущую способность при воздействии динамических нагрузок и знакопеременных температур.

Неорганизованная концентрация и движение жидких атмосферных осадков на покрытии автодороги помимо снижения безопасности дорожного движения приводит к формированию временных нерусловых потоков с откосов земляного полотна.

Данные процессы приурочены к участкам изменения продольного профиля автомобильной дороги или траектории движения (виражам, пересечениям, подъемам и спускам) [9]. Сила воздействия подобных потоков зависит от схемы поверхностного водоотведения, плана организации рельефа дороги и полосы отвода, а также энергии рельефа местности.

Наиболее подвержены возникновению нерусловых потоков с откосов земляного полотна участки автодорог со схемой поверхностного водоотведения в виде свободного стекания воды по поверхности проезжей части дороги на обочины и далее на откосы. В этом случае повреждение земляного полотна автодороги происходит вследствие эрозии, формирования склоновых селей или вязкопластичных оползней грунта земляного полотна со стороны низового откоса (рис. 1).

Фильтрационные потоки, возникающие вследствие подтопления, приводят к переувлажнению и разуплотнению грунтов земляного полотна. В результате разуплотнения грунтов под действием взвешивающего действия воды, ча-



Рис. 2. Разрушение конструкций водопропускной трубы в процессе эксплуатации. Автодорога Южно-Сахалинск–Оха. Средний Сахалин, 2017 г.

стичного растворения минеральных частиц и их суффозионного выноса под действием гидродинамического давления фильтрационного потока, развития вязкопластичных деформаций в теле земляного полотна при проявлении реологических свойств также происходит разрушение верхового и низового откосов [18].

Стоит отметить, что при резком увеличении уровня воды с подтопленной стороны происходит значительное увеличение гидродинамического давления фильтрационного потока на низовой откос. Согласно механике грунтов и теории фильтрации, сила гидродинамического воздействия фильтрационного потока на откос прямо пропорциональна градиенту напора [1]:

$$J = H/L,$$

где H – градиент напора (разность горизонтов воды); L – длина пути фильтрации.

Таким образом, даже незначительные колебания уровня воды могут привести к повреждению низового откоса подтопленной земляной насыпи автодороги.

Застой воды в полосе отвода автодороги с нагорной стороны затрудняют фильтрацию и отток воды из переувлажненных потенциальных оползневых и селевых массивов, тем самым способствуя активизации опасных склоновых экзогенных процессов, увеличению морозного пучения дорожных одежд и др.

Отсутствие водосбросных сооружений может приводить к образованию размывов и активизации опасных экзогенных процессов со стороны низового откоса. Водные потоки в местах сброса находятся чаще всего в бурном состоянии и обладают большой кинетической энергией. Скорость потока может достигать 2–3 м/с, что существенно превышает нормативные неразмывающие скорости для несвязных грунтов (0.7–1.0 м/с).

Конструктивные дефекты систем водоотведения

Конструктивные дефекты систем водоотведения могут быть представлены:

- недостаточной пропускной способностью сооружений;
- несоблюдением требуемой скорости потока;
- нарушением сбора и концентрации потока.

Конструктивные дефекты систем водоотведения могут относиться к различным элементам водосборных и водосбросных сооружений, обладающим недостаточными эксплуатационными характеристиками или утратившими их в результате обветшания или повреждения (рис. 2).

Недостаточная пропускная способность водопропускных сооружений выражается в нарушении их гидравлического режима или отсутствии возможности пропуска паводковых вод, карчеходов или селепропуска.

В период паводков происходит переход водопропускных сооружений в полупапорный, напорный или переходный режимы работы, сопряженные с подтоплением верхового и низового откосов. Значительные колебания напора, скорости и давления, а также турбулентные пульсации при работе в переходных режимах могут представлять угрозу для исправности и конструктивной целостности самого водопропускного сооружения, вызывая повреждения оголовков, смещение в плане и профиле его звеньев и раскрытие швов [1, 10].

Отсутствие возможности селепропуска и карчеходов приводит к заиливанию или заваливанию отверстий водопропускных сооружений и выходу их из строя (рис. 3), что может повлечь повреждение земляного полотна автодороги и верхнего бьефа [2].

Значительно снижает пропускную способность в период паводков и селепрохождений использование двух- и многоочковых водопропускных труб (см. рис. 3б), а также размещение раз-



Рис. 3. Водопрпускные сооружения, заваленные селевыми отложения и корчами: а – автодорога Южно-Сахалинск–Оха. Средний Сахалин, 2018 г.; б – автодорога Южно-Сахалинск–Оха. Средний Сахалин, 2009. г.



Рис. 4. Автодорога Южно-Сахалинск–Оха. Средний Сахалин, 2017 г.: а – разрушение нижнего бьефа; б – необорудованный входной оголовок.



Рис. 5. Динамика развития селевых бассейнов на морских террасах: а – г. Магадан, б – Средний Сахалин.

личного рода коммуникаций и трубопроводов в пределах живого сечения водотоков. Поток, насыщенный твердым материалом (взвешенными частицами, придонными наносами, корчами, дерном и т.д.), испытывает значительное сопротивление, преодолевая подобного рода препятствия, что неизменно приводит к отложению и аккумуляции переносимого материала.

На участках морских террас наиболее часто проблема недостаточной пропускной способности встречается в местах пересечения малых горных водотоков, а также антропогенно измененных водосборах. Попытки осреднения расчетных данных на стадии проектирования малых водопропускных сооружений, а также назначение их параметров конструктивно, зачастую приводят к несоответствию их эксплуатационных характеристик реальному гидрологическому режиму малого водосборного бассейна и как следствие недостаточной пропускной способности.

Несоблюдение требуемой скорости потока относится как к превышению максимальной допустимой скорости, так и к обеспечению требуемой минимальной скорости.

Недостаточные скорости водного потока в водосборных сооружениях приводят к их заиливанию и выходу из строя. Вследствие превышения максимальной допустимой скорости водного потока происходят преждевременный износ водопропускных сооружений и размывы русел, бьефов, откосов, а также активное развитие селевых и оползневых процессов в нижнем бьефе (рис. 4а).

Дефекты сбора и концентрации потока относятся к водосборным (водоприемным и водопропускным) и водосбросным сооружениям.

Среди дефектов водоприемных сооружений, не обеспечивающих надлежащий сбор поверхностных вод, наиболее часто встречаются: повреждение или отсутствие входных оголовков и противодиффузионных элементов (см. рис. 4б), недостаточный объем верхних бьефов. Дефекты водоприемных сооружений приводят к размыву со стороны верхового откоса гидродинамическими потоками, повреждению низового откоса и переувлажнению земляного полотна фильтрационными потоками.

К дефектам водопропускных сооружений, не обеспечивающим концентрацию потока при его пропуске, относятся: смещение секций и звеньев, раскрытие швов, переливы канав. Данные дефекты обуславливают возникновение фильтрационных потоков в земляном полотне, в отдельных случаях размывы.

К конструктивным дефектам водосбросных сооружений, не обеспечивающим концентрацию водного потока, относится и отсутствие сопряжения водопропускного и водосбросного сооружения. В данном случае водный поток не поступает

частично или в полном объеме к водосбросным сооружениям (перепадам, гасителям, быстроткам, трамплинам и т.д.), что приводит к размывам и развитию опасных экзогенных процессов со стороны низового откоса.

Недостаточная пропускная способность и несоблюдение требуемой скорости потока являются дефектами стадии проектирования. Для устранения данных дефектов требуется значительные затраты на дополнительные проектно-исследовательские работы, последующие демонтажные и строительно-монтажные работы. Дефекты сбора и концентрации потока могут быть не учтены на стадии проектирования, но чаще проявляются на стадиях строительства и эксплуатации. Для их устранения требуется капитальный ремонт или реконструкция сооружения.

ОБРАТНЫЙ ЭФФЕКТ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОСИСТЕМ МОРСКИХ ТЕРРАС

Важную роль в развитии морских террас играют экзогенные геодинамические процессы. Они образуют разнообразные отрицательные формы рельефа, преобразуют профиль морской террасы, формируют различные генетические типы отложений. Наибольшее влияние на эти процессы переноса вещества и энергии оказывают эрозия, денудация и абразия. Внутри геосистемы морских террас процессы переноса вещества и энергии находятся в состоянии предельного равновесия, обусловленного относительным равенством потенциальной энергии рельефа и кинетической энергии геодинамических процессов. Увеличение доли кинетической энергии внутри геосистемы активизирует процессы переноса вещества и энергии и преобразования рельефа.

Для оценки антропогенного воздействия на активизацию геодинамических процессов и эволюцию геосистем морских террас были выделены контрольные участки автомобильных дорог, исследовано их геологическое строение, геоморфологические и геоботанические признаки проявления экзогенных геодинамических процессов, проанализированы имеющиеся фондовые данные.

Наблюдения проводились за скоростью роста эрозионных и денудационных форм рельефа, скоростью выветривания горных пород и формированием потенциальных оползневых и селевых массивов, изменением характеристик геодинамических процессов и их активизацией при антропогенном воздействии, разрушением автомобильных дорог под действием опасных экзогенных процессов (рис. 5).

По результатам исследования установлено, что изменение рельефа при строительстве автомобильных дорог (подрезка склонов, формиро-

вание насыпей и выемок) приводит к нарушению состояния равновесия земляных масс и увеличению потенциальной энергии рельефа, что в последствии увеличивает динамические характеристики опасных экзогенных процессов (объем, скорость, давление на препятствие, дальность выброса).

Кроме того, строительство автомобильных дорог оказывает влияние на геологическую среду геосистемы морских террас. Сведение растительности, подрезка склонов, механизированная обработка грунтов нарушает их температурный режим, увеличивает скорость выветривания, снижает физико-механические характеристики горных пород, что приводит к активному их вовлечению в опасные экзогенные процессы.

Изменение гидрологического режима территории при сведении растительности, организации сбора и отведения поверхностных вод также способствует активизации геодинамических процессов и росту их динамических характеристик.

Негативное воздействие обратного эффекта влияния дефектов систем водоотведения автомобильных дорог на изменение геосистем морских террас выражается в активизации опасных геодинамических процессов, увеличению их динамических характеристик и преобразованию рельефа.

ВЫВОДЫ

Морское побережье о. Сахалин характеризуется сложными инженерно-геологическими и климатическими условиями, а также широким распространением опасных экзогенных процессов, что обуславливает необходимость особенно тщательного подхода к материалам инженерных изысканий. При проведении инженерных изысканий необходимо определять инженерно-геологические условия и характеристики компонентов геосистем не только в полосе отвода объекта, но и в пределах всей геоморфологической единицы, к которой приурочен объект, что в настоящее время строго не регламентировано действующими техническими нормативами.

Строительство автомобильных дорог на морских террасах, оказывает влияние на компоненты геосистемы морских террас: рельеф, геологическую среду и гидрологический режим, что может вызывать обратный негативный эффект, представляющий угрозу конструктивной целостности автомобильных дорог вследствие активизации опасных экзогенных процессов.

Наиболее часто на активизацию опасных экзогенных процессов оказывают влияние дефекты системы водоотведения, среди которых можно выделить отсутствие системы водоотведения и конструктивные дефекты водосборных и водосбросных сооружений. Дефекты систем водоот-

ведения приводят к застоям воды на покрытии и в пределах полосы отвода, формированию фильтрационных и напорных гидродинамических потоков, временных нерусловых потоков с откосов земляного полотна, денудации земляного полотна и полосы отвода, а также развитию опасных экзогенных процессов.

Поскольку на стадии изысканий и проектирования автомобильных дорог, расположенных на морских побережьях, затруднительно спрогнозировать последствия антропогенного воздействия на компоненты геосистемы морских террас, за возводимыми объектами необходимо вести регулярный мониторинг для возможного оперативного принятия решений по предотвращению развития опасных экзогенных процессов, в том числе проводить регулярное обследование водопрпускных сооружений, дорожного покрытия, земляного полотна и полосы отвода объекта в периоды активизации опасных экзогенных процессов: после снеготаяния и интенсивных ливневых осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтунин В.И., Суэтина Т.А., Черных О.Н. Гидравлические расчеты водопропускных труб на автомобильных дорогах: учеб. пос. М.: МАДИ, 2016. 92 с.
2. Булдаков С.И. Проектирование основных элементов автомобильных дорог: учеб. пос. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2011. 295 с.
3. Васильев А.П., Баловнев В.И. и др. Ремонт и содержание автомобильных дорог. Справочник инженера-дорожника. М.: Транспорт, 1989. 287 с.
4. Геология СССР. Том 33. Остров Сахалин. М.: Недра, 1970. 403 с.
5. Гурьев Т.А. Строительство автомобильных дорог. Ч. 1. Дефекты, повреждения и разрушения земляного полотна автомобильных дорог. Архангельск: АГТУ, 1997. 16 с.
6. Земцова А.И. Климат Сахалина. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 197 с.
7. Ильина А.А. Об основных требованиях и правилах устройства, содержания и ремонта сооружений поверхностного водоотвода автомобильных дорог // Автомоб. дороги: Науч.-техн. информ. сб. Вып. 1. М.: Информавтодор, 2001. С. 14–26.
8. Каталог типичных дефектов содержания конструктивных элементов автомобильных дорог М.: Информавтодор, 1998. 28 с.
9. Крицкий М.Я., Шестаков В.Н. О классификации дефектов земляного полотна автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2007. Вып 5. С. 69–76.
10. Лисов В.М. Дорожные водопропускные трубы. М.: ТИМР, 1998. 140 с.
11. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6.

- Выпуск 34. Сахалинская область Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 350 с.
12. *Перевозников Б.Ф.* Водоотвод с автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1982. 190 с.
 13. *Перевозников Б.Ф., Ильина А.А.* Сооружения системы водоотвода с проезжей части автомобильных дорог. М.: Информавтодор, 2002. 60 с.
 14. Приказ Минтранса РФ от 8 июня 2012 г. N 163 "Об утверждении Порядка проведения оценки уровня содержания автомобильных дорог общего пользования федерального значения".
URL: <http://docs.cntd.ru/document/902353741>
 15. *Рыбальченко С.В., Верховов К.В.* Склоновые селевые бассейны и их морфодинамические особенности // Геориск. 2017. № 4. С. 44–49.
 16. *Рыбальченко С.В., Верховов К.В.* Этапы формирования селевых бассейнов на склонах морских террас Нагаевской бухты полуострова Старицкого (г. Магадан) // Вестник ДВО РАН. 2016. № 5. С. 94–99.
 17. *Рычагов Г.И.* Общая геоморфология Учебник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 2006. 416 с.
 18. *Трескинский С.А.* Склоны и откосы в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1984. 157 с.
 19. *Branco L.H.C., Segantine P.C.L.* Maniac-uav a methodology for automatic pavement defects detection using images obtained by unmanned aerial vehicles. 4th International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences (IC-MSquare2015). IOP PUBLISHING. Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 633. No. 1. P. 012122.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/633/1/012122>
 20. Guidance notes catalogue of road defects (CORD) Research & Development Division RD/GN/015 B January 2013. URL: https://www.hyd.gov.hk/en/publications_and_publicity/publications/technical_document/guidance_notes/pdf/GN015B.pdf
 21. *Saar T., Talvik O.* Automatic Asphalt pavement crack detection and classification using Neural Networks // Proc. of the 12th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC10). 2010. P. 345–348.
<https://doi.org/10.1109/BEC.2010.5630750>.

IMPACT OF ERRORS IN WATER DRAINAGE SYSTEMS OF HIGHWAYS ON THE MARINE TERRACE GEOSYSTEMS

S. V. Rybal'chenko^{a, #} and A. S. Oganezov^{b, ##}

^a *Special Design Engineering Bureau for Automation of Marine Researches, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Maksima Gor'kogo, 25, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000 Russia*

^b *Sakhalin State University, Kommunisticheskii pr., 33, Yuzhno-Sakhalinsk, 693000 Russia*

[#] *E-mail: rybalchenko_sv@mail.ru*

^{##} *E-mail: artusur@mail.ru*

Errors in drainage system arrangement at the stage of research, design, construction and operation of highways play a significant role in the intensification of processes that pose threat to the structural integrity of roads and road safety. Unorganized collection and removal of surface water from the roadway lead to the development of denudation, erosion, rheological and mudflow processes in the roadbed body or in a close proximity to it. Due to the peculiarities of sea terraces (geomorphological, geological and hydrological), the transport and operational characteristics of highways are significantly reduced. On the basis of field observations, the most characteristic defects of road elements located on sea terraces are identified. Two groups of defects in drainage systems have been distinguished: the lack of organized drainage and structural defects of culverts. Defects in drainage systems damage various road units. The mechanism of the negative impact of defects in drainage systems on the structural integrity of transport highways embraces a number of phenomena: stagnation of water on the surface, filtration and pressure of hydrodynamic flows, temporary off-channel flows from the slopes of the subgrade, as well as hazardous exogenous processes in the body of the earth canvas and in the right-of-way. In order to prevent the consequences of defects in drainage systems at the stage of design, construction, reconstruction and operation of highways, it is necessary to meet all the necessary requirements of normative documents in the field of wastewater disposal, as well as to take into account engineering geological, geomorphological and climatic features of the territories of sea coasts, including sea terraces.

Keywords: *culverts, subgrade, defects in water disposal systems, dangerous exogenous processes, filtration flows, erosion*

REFERENCES

1. Altunin, V.I., Suetina, T.A., Chernykh, O.N. *Gidravlicheskie raschety vodopropusknykh trub na avtomobil'nykh dorogakh* [Hydraulic calculations of culverts on highways]. Moscow, MADI Publ., 2016, 92 p. (in Russian)
2. Buldakov, S.I. *Proektirovanie osnovnykh elementov avtomobil'nykh dorog* [Design of the main units of highways]. Yekaterinburg, Ural State Forestry University Publ., 2011, 295 p. (in Russian)
3. Vasil'ev, A.P., Balovnev, V.I., et al. *Remont i sodержание avtomobil'nykh dorog. Spravochnik inzhenera-*

- dorozhnika*. [Repair and maintenance of highways. Handbook of a road engineer]. Moscow, Transport Publ., 1989, 287 p. (in Russian)
4. *Geologiya SSSR. Tom 33. Ostrov Sakhalin*. [Geology of the USSR. Volume 33. Sakhalin Island]. Moscow, Nedra Publ., 1970, 403 p. (in Russian)
 5. Gur'ev, T.A. *Stroitel'stvo avtomobil'nykh dorog. Ch. I. Defekty, povrezhdeniya i razrusheniya zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog* [Construction of highways. Part 1. Defects, damage and destruction of the roadbed]. Arkhangelsk, AGTU Publ., 1997, 16 p. (in Russian)
 6. Zemtsova, A.I. *Klimat Sakhalina*. [Sakhalin climate]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1968, 197 p. (in Russian)
 7. Il'ina, A.A. On the basic requirements and rules for the construction, maintenance and repair of structures for surface drainage of highways. *Avtomobil'nye dorogi: nauchno-tekhnicheskii informatsionnyi sbornik* [Highways: scientific and technical information collection]. Moscow, Informavtodor Publ., 2001, vol. 1, pp. 14–26 (in Russian)
 8. *Katalog tipichnykh defektov sodержaniya konstruktivnykh elementov avtomobilnykh dorog* [Catalog of typical defects in the maintenance of structural elements of highways]. Moscow, Informavtodor Publ., 1998, 28 p. (in Russian)
 9. Kritskii, M.Ya., Shestakov, V.N. [On the classification of defects of the road subgrade]. *Vestnik SibADI*, 2007, vol. 5, pp. 69–76. (in Russian)
 10. Lisov, V.M. *Dorozhnye vodopusknye truby* [Road culverts]. Moscow, TIMR Publ., 1998, 140 p. (in Russian).
 11. *Nauchno-prikladnoi spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Chasti 1-6. Vypusk 34. Sakhalinskaya oblast* [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Series 3. Long-term data. Parts 1-6. Issue 34. Sakhalin Region]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 350 p. (in Russian)
 12. Perevoznikov, B.F. *Vodootvod s avtomobil'nykh dorog* [Drainage from roads]. Moscow, Transport Publ., 1982, 190 p. (in Russian)
 13. Perevoznikov, B.F., Il'ina, A.A. *Sooruzheniya sistemy vodootvoda s proezzhei chasti avtomobil'nykh dorog* [Construction of drainage system from the roadway]. Moscow, Informavtodor Publ., 2002, 60 p. (in Russian)
 14. *Prikaz Mintransa RF ot 8 iyunya 2012 g. N 163 "Ob utverzhdenii Poryadka provedeniya otsenki urovnya sodержaniya avtomobilnykh dorog obshchego polzovaniya federal'nogo znacheniya"* [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated June 8, 2012 no. 163 "On approval of the Procedure for assessing the level of maintenance of federal public roads."]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902353741>. (in Russian)
 15. Rybal'chenko, S.V., Verkhovov, K.V. *Sklonovye selevye basseiny i ikh morfodinamicheskie osobennosti* [Slope mudflow basins and their morphodynamic features]. *Georisk*, 2017, no. 4, pp. 44–49. (in Russian)
 16. Rybal'chenko, S.V., Verkhovov, K.V. *Etapy formirovaniya selevykh basseinov na sklonakh morskikh terras Nagaevskoi bukhty poluoostrova Staritskogo (g. Magadan)* [Stages of formation of mudflow basins on the slopes of the sea terraces of the Nagaev Bay of the Staritskii Peninsula (Magadan)]. *Vestnik DVO RAN*, 2016, no. 5, pp. 94–99. (in Russian)
 17. *Rychagov, G.I. Obshchaya geomorfologiya* [General geomorphology]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 416 p. (in Russian)
 18. Treskinskii, S.A. *Sklony i otkosy v dorozhnom stroitel'stve* [Slopes and slopes in road construction]. Moscow, Transport Publ., 1984, 157 p. (in Russian)
 19. Branco, L.H.C., Segantine, P.C.L. Maniac-uav a methodology for automatic pavement defects detection using images obtained by unmanned aerial vehicles. 4th Int. Conf. on Mathematical Modeling in Physical Sciences (IC-MSquare2015). IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015, vol. 633, no. 1, p. 012122. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/633/1/012122>
 20. Guidance notes catalogue of road defects (CORD) Research and Development Division RD/GN/015 B January 2013. URL: https://www.hyd.gov.hk/en/publications_and_publicity/publications/technical_document/guidance_notes/pdf/GN015B.pdf.
 21. Saar, T., Talvik, O. Automatic asphalt pavement crack detection and classification using neural networks. Proc. of the 12th biennial Baltic electronics conference (BEC10). 2010, pp. 345–348. <https://doi.org/10.1109/BEC.2010.5630750>.