

УДК 55; 504.05; 504.5

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-97-107

ОСОБЕННОСТИ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Виктор Титович Трофимов¹, Марина Анатольевна Харьковина²✉

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; trofimov@rector.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kharkina@mail.ru✉

Аннотация. Описаны виды техногенных воздействий оборонно-промышленных комплексов на компоненты эколого-геологических систем (ЭГС). Дана характеристика абиотических компонент ЭГС оборонно-промышленных комплексов, включающая информацию по технолитотопам и техноэдафотопам. На конкретных примерах показано влияние абиотических компонент ЭГС территорий военно-производственных комплексов, военных складов и испытательных полигонов России и сопредельных государств на биотические компоненты ЭГС, включая техномикробоценоз, технофитоценоз и технозооценоз. Показано, что изменения в абиотической части ЭГС оборонно-промышленных комплексов приводят к снижению численности микроорганизмов и подавлению жизненных процессов у растений при загрязнении грунтов и почв ракетным топливом, к тугоухости летчиков истребительно-бомбардировочной авиации при возникновении техногенных акустических аномалий, к гибели людей и всего живого при возникновении техногенных температурных аномалий и последующих пожарах при взрывах при взлете ракет-носителей.

Ключевые слова: технолитотоп, техноэдафотоп, техномикробоценоз, технофитоценоз, технозооценоз, военные полигоны, взрывы, почвы, грунты, подземные воды, загрязнение, акустические аномалии, температурные аномалии

Для цитирования: Трофимов В.Т., Харьковина М.А. Особенности эколого-геологических систем оборонно-промышленных комплексов на территории России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 97–107.

PECULIARITIES OF ECOLOGICAL-GEOLOGICAL SYSTEMS OF DEFENSE -INDUSTRIAL COMPLEXES IN RUSSIA

Viktor T. Trofimov¹, Marina A. Kharkina²✉

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; trofimov@rector.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kharkina@mail.ru✉

Abstract. The types of technogenic impacts of defense-industrial complexes on the components of ecological-geological systems (EGS) are described. Abiotic components of EGS of defense-industrial complexes are characterized, including information on technolithotopes and technoedaphotopes. Specific examples are used to demonstrate the influence of abiotic components of EGS of military-production complexes, military depots, and test sites in Russia and neighboring countries on the biotic components of EGS, including technomicrocoenosis, technophytocoenosis, and technozoocenosis. It has been shown that changes in the abiotic part of the EGS of defense-industrial complexes lead to a decrease in the number of microorganisms and the suppression of vital processes in plants when soils and grounds are contaminated with rocket fuel, to hearing loss in fighter-bomber pilots when man-made acoustic anomalies occur, to the death of people and all living things when man-made temperature anomalies occur and subsequent fires during explosions under takeoff of launch vehicles.

Keywords: technolithotope, technoedaphotope, technomicrocenosis, technophytocenosis, technozoocenosis, military test sites, explosions, soils, grounds, groundwater, pollution, acoustic anomalies, temperature anomalies

For citation: Trofimov V.T., Kharkina M.A. Peculiarities of ecological-geological systems of defense-industrial complexes in Russia. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 97–107. (In Russ.).

Введение. Эколого-геологическая система оборонно-промышленных комплексов — это открытая динамическая система, возникающая на техногенно освоенной территории и включающая три подсистемных блока: абиотический (технолитосфера и технопедосфера), биотический (техномикробоценоз, технофитоценоз, технозооценоз) и источники техногенного воздействия, тесно связанные причинно-следственными связями, обуславливающими ее структурно-функциональное единство. По источ-

никам техногенного воздействия среди оборонно-промышленных ЭГС выделяют военно-производственные, военно-складские, военно-аэродромные и ЭГС военных полигонов. Если степень изменений оборонно-промышленных ЭГС меньше 50%, то возникают сухопутные техногенно-природные ЭГС [Королёв, Трофимов, 2025]. В большинстве случаев в эту категорию входят военно-производственные, военно-складские и военно-аэродромные ЭГС. Если степень изменений больше 50%, то образуются

природно-техногенные ЭГС, к ним в большинстве случаев относятся ЭГС военных полигонов.

Оборонно-промышленные комплексы оказывают сильнейшие воздействия как на абиотическую, так и биотическую часть экосистем (табл. 1). Воздействия на абиотическую часть ЭГС связано, в первую очередь, с механическим и физическим воздействием, с загрязнением почв, грунтов, подземных вод химическими веществами и элементами, включая радиоактивные. Особенно это касается военных полигонов по испытанию ядерного оружия, где происходит загрязнение радионуклидами. Одними из наиболее опасных радионуклидов являются долгоживущие продукты деления ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28,8$ года), ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,1$ лет) и остаточное ядерное горю-

чее — изотопы плутония, периоды полураспада которых составляют для ^{238}Pu $T_{1/2} = 87,7$ лет, ^{239}Pu $T_{1/2} = 24065$ лет, а для ^{240}Pu $T_{1/2} = 6537$ лет. Накопление ^{241}Am ($T_{1/2} = 432,6$ года) является следствием распада ^{241}Pu , имеющего период полураспада 14,3 года, доля активности которого со временем только увеличивается, достигая 10% и более. Основные воздействия на эколого-геологические системы оказывают наземные ядерные взрывы, которые на поверхности литосферы оставляют радиоактивный след.

На Новоземельском испытательном полигоне, расположенном на архипелаге Новая Земля, преобладали воздушные ядерные испытания. Здесь был произведен лишь один небольшой по мощности наземный ядерный взрыв, локальный след от которого

Таблица 1

Основные техногенные воздействия оборонно-промышленных комплексов на компоненты ЭГС

Виды ЭГС	Виды воздействий на компоненты ЭГС					
	На абиотические компоненты ЭГС		На биотические компоненты ЭГС			
	технолитотоп	техноэдафотоп	техно-микробиоценоз	технофитоценоз	технозооценоз	человеческое сообщество
ЭГС воен-но-произ-водственных комплексов	Механические изменения верхней части геологического разреза, воздействие загрязнения и трансформация геохимических полей на участках сброса стоков и аварийных утечек		Токсикологические воздействия		Нервно-паралитические воздействия, воспаление кожных покровов, удушающее воздействие, раздражение слизистых оболочек, психотропное воздействие в связи с накоплением токсичных веществ	
ЭГС воен-но-складских комплексов	Воздействие загрязнения нефтепродуктами на грунты и подземные воды, возникновение геохимических аномалий	Воздействие загрязнения нефтепродуктами на почвы, возникновение геохимических аномалий	Воздействие на численность микроорганизмов	Воздействие на биомассу растений	Деградация животного мира	Воздействие на здоровье человека в случае загрязнения водозаборов
ЭГС военно-аэродромных комплексов	Выравнивание поверхности, возникновение электромагнитных, тепловых и акустических аномалий; повышение электромагнитного фона	Загрязнение металлами, твердыми частицами топлива и компонентами антиобледенителей и противогололедных реагентов, возникновение электромагнитных и акустических аномалий	Воздействие на численность микроорганизмов	Воздействие на биомассу растений	Сердечно-сосудистые заболевания и расстройство центральной нервной системы из-за работы радиолокационных станций навигации, снижение слуховой чувствительности из-за шумовых воздействий работающих двигателей	
ЭГС военных полигонов	Изменение рельефа за счет создания фортификационных сооружений и образования воронок от взрывов; изменение структуры и физических показателей грунтов на участках взрыва, загрязнение грунтов и подземных вод, активизация сейсмической активности и ЭГП, возникновение тепловых аномалий при запуске ракет	Возникновение геохимических аномалий в связи с загрязнением ТМ, радионуклидами и твердыми частицами топлива	Воздействие остатков ракетного топлива на численность микроорганизмов различных физиологических и таксономических групп	Воздействие разливов ракетного топлива, механические повреждения осколками снарядов наземной части растений	Физические воздействия: в случае ядерных испытаний: воздействие ударной волны, светового излучения, проникающей радиации. Термические воздействия при авариях при взлете ракет-носителей	

в основном сформировался на территории полигона. При воздушных взрывах ядерных зарядов крупного и сверхкрупного калибров, которые в основном осуществлялись на этом полигоне, основная масса радиоактивных веществ поступала в стратосферу, откуда они попадали на поверхность земли в виде глобальных выпадений. После проведения этих испытаний в атмосфере и под водой отмечалось повышение гамма-фона на материковой части страны побережья Ледовитого океана, однако суммарные дозы облучения населения, как правило, не превышали санитарно-гигиенические нормативы [Логачев, 2004].

Характеристика абиотических компонент ЭГС оборонно-промышленных комплексов включает информацию по технолитотопам и техноэдафотопам, причем технолитотоп подразумевает описание геологического строения, рельефа, гидрогеологических условий, геохимических, геодинамических и геофизических полей. Полностью охарактеризовать технолитотоп удалось только для ЭГС военных полигонов. В связи с закрытостью темы абиотические компоненты эколого-геологических систем военно-производственных, военно-складских и военно-аэродромные охарактеризованы фрагментарно.

Эколого-геологические системы военно-производственных комплексов. Военно-производственные комплексы включают следующие отрасли оборонной промышленности: авиационную, судостроительную, электронную промышленности, производство боеприпасов и спецхимии ракетно-космической техники, промышленность вооружений, средств связи, радиопромышленность. Их создание потребовало строительство огромного комплекса не только специально ориентированных производств, но и гражданских сооружений, включая селитебные комплексы.

Создание военно-производственных комплексов приводит к возникновению техногенных геохимических полей в литотопе и эдафотопе. В местах производства различных боевых отравляющих веществ (БОВ или химического оружия) происходит трансформация природных геохимических полей литосферы, особенно это касается подземных вод [Александров, 1990]. Производство боевых отравляющих веществ связано с использованием для производственных нужд большого количества речной воды. В нашей стране военные химические предприятия располагаются исключительно на берегах полноводных рек — Волги, Оки и Камы. В случае аварий происходят существенные изменения в эколого-геологической обстановке. Так, в Волгограде на ПО «Химпром», производившем фосфорные отравляющие вещества зорин и заман в середине 1960-х годов имел место прорыв в Волгу высокотоксичных стоков цеха № 34 [Химия и жизнь, 1996].

Отметим, что оборонно-промышленные комплексы в первой половине XX века размещались в крупных городах России. Достаточно сказать, что даже в Москве размещались химические полигоны,

центральные склады химоружия, не менее четырех заводов по производству отравляющих веществ, двух головных научных институтов химической войны (военного и промышленного), военно-химического управления, медицинских служб (рис. 1), которые, безусловно, оказывали или могли оказать воздействие на условия существования живых организмов и населения. Понадобились десятилетия, чтобы наиболее опасная для большого города часть этой инфраструктуры оборонно-промышленного комплекса стала постепенно перемещаться из столицы вглубь страны.

Эколого-геологические системы военно-складских комплексов. В России известны места расположения крупнейших складов хранения химического оружия. Так, по состоянию на 1996 г. в пос. Горный (Саратовская обл.) на складах хранилось 225 т люизита, 690 т иприта и 210 т ипритно-люизитных смесей¹, в городском поселении Камбарка (Удмуртия) на складах хранилось 6400 т люизита², а в пос. Кизнер (Удмуртия) располагались склады боеприпасов (снарядов и мин) с фосфорными отравляющими веществами емкостью до 8 л для ствольной реактивной артиллерии³ [Химия ..., 1996].

В районах расположения складов горюче-смазочных материалов при их утечке высока вероятность загрязнения нефтепродуктами подземных вод. Один из таких участков выявлен в районе г. Моздок (Республика Северная Осетия — Алания), где техническим керосином загрязнены воды нижне-среднеплейстоценового водоносного горизонта, которые используются для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения населением г. Моздок. Наблюдениями, проводимыми службами Государственного мониторинга состояния недр, в 2006 г. были выявлены линзы свободного керосина максимальной мощностью пленок до 36 см [Информационный бюллетень..., 2006]. Мощность пленок свободного керосина постепенно уменьшалась и составляла в 2009 г. 22–31 см, а начиная с 2015 г. сведения о линзах керосина отсутствуют в связи с введением особого режима на аэродроме и невозможностью обследования скважин. Содержание авиационного керосина в наблюдательных скважинах в 2008 г. составляло от 0,5 до 84,0 ПДК, причем присутствие нефтепродуктов периодически фиксировалось и в водозаборных скважинах. С течением времени концентрации керосина в нижне-среднеплейстоценовом водоносном горизонте падала и в 2014 г. составляла от 0,5 до 13,5 ПДК в бытовых колодцах, расположенных в южной части г. Моздок. Моздокский техногенный участок загрязнения нефтепродуктами сохранял свои пространственные границы и площадь (163 км²), начиная с 2008 г. до 2021 г. [Информационный ..., 2022].

¹ Склад уничтожен в 2005 г.

² Запасы люизита уничтожены в 2006–2010 гг.

³ Химические боеприпасы уничтожены в 2017 г.

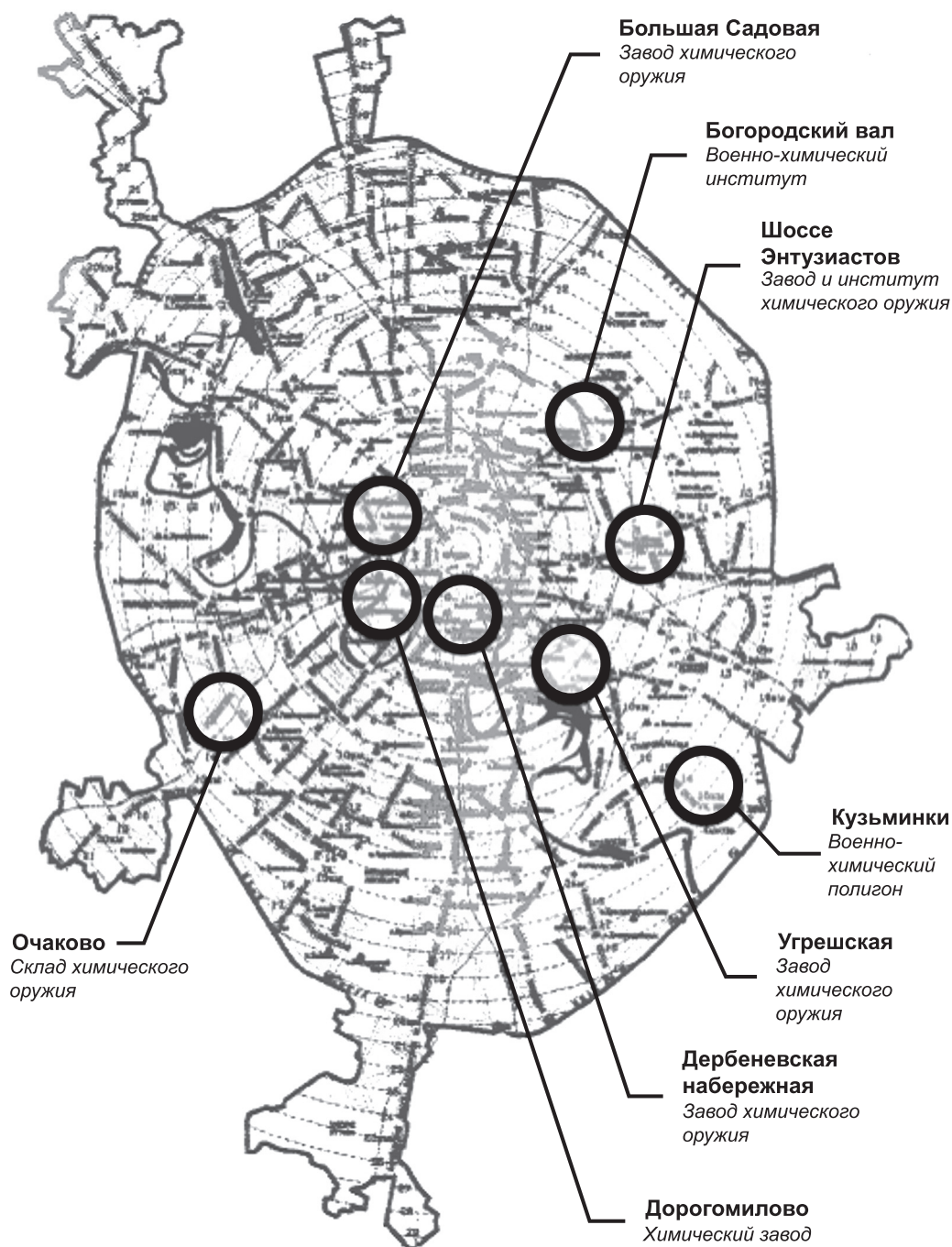


Рис. 1. Участки производства, испытаний и хранения химического оружия в Москве в первой половине XX века [Федоров, 2009]

Эколого-геологические системы военно-аэродромных комплексов. В абиотической части ЭГС военно-аэродромных комплексов отмечается техногенная трансформация *рельефа*. Военные аэродромы представляют собой выровненные площадки. В условиях Великой отечественной войны 1941–1945 гг. полевые аэродромы располагались в лесных массивах на выровненных и утрамбованных тяжелыми катками участках местности. Так, на аэродроме Павлово, относящимся к Юхновским аэродромам, большое летное поле имело размеры 1×2 км, где базировались тяжелые бомбардировщики ТБ-3, скоростные бомбардировщики СБ-2 и «пикиров-

щики» Пе-2 ВВС 24-й армии Резервного фронта, а также истребители МиГ-3 ПВО Московского военного округа. Сейчас площади военных аэродромов существенно выросли, только взлетно-посадочная полоса аэродрома Угольный в Анадыре (Чукотский АО) составляет 3,5 км.

В районе военных аэродромов происходит загрязнение воздушного бассейна, связанного с применением значительного количества разнообразных по химическому составу соединений. Вследствие осадения токсичных веществ из атмосферного воздуха и сброса сточных вод происходит загрязнение поверхностных вод и почвы аэродрома и прилега-

ющей к нему территории. Возникают *техногенные геохимические аномалии*. Выбросы газотурбинных двигателей военной авиации наиболее значительны при взлете-посадке, т.е. в непосредственной близости к аэродрому. Масса топлива, необходимого для обеспечения полета составляет от 30 до 60% взлетной массы самолета, а невырабатываемый остаток топлива, который военная авиационная техника при возвращении на аэродром должна «досжигать» на взлетно-посадочной полосе (ВВП) достигает 3–4% от ее полной заправки.

Анализ почвы приаэродромных территорий показал [Шевырев, 2004], что масса загрязнений твердыми частицами 1 м² поверхности в центре летного поля в 4–6 раз ниже концевых участков взлетной полосы. Элементами-загрязнителями являются магний, алюминий, кремний, сера, калий, кальций, титан и железо в различных соединениях с кислородом. Проведенная на территории аэродрома оценка уровня загрязнения почвы твердыми частицами определила элементарный состав загрязнителей, который включает такие тяжелые металлы как свинец (Pb), кадмий (Cd), цинк (Zn), медь (Cu), никель (Ni), хром (Cr), при этом количественный анализ выявил превышение нормативного значения по Pb, Cd, Zn, Cu [Геворгян и др., 2013]. Установлены места наибольшего скопления элементов-загрязнителей — это начало и конец ВВП.

Развернутый химический анализ почв показал, что в установленный ранее перечень обязательных к контролю соединений в почвах аэродромов необходимо включить еще такие элементы, как цезий, скандий, ниобий, сурьма [Кочеткова и др., 2024]. Повышенное содержание цезия на территориях аэродромов государственной авиации возможно объяснить тем, что этот металл применяют в составе присадок к топливу для уменьшения радиолокационной заметности шлейфов выхлопных газов; карбонат цезия добавляют в стекло для повышения стабильности и долговечности волоконной оптики и приборов ночного видения. Скандий широко используется для получения прочных, жаростойких и легких алюминиево-скандиевых сплавов, применяемых в самолетостроении; компонентов микроэлектроники и флуоресцирующих красок для разметки ВПП; для производства осветительных приборов высокой интенсивности, используемых на аэродромах. Из чистого ниобия или его сплавов изготавливают детали летательных аппаратов. Сурьма все больше применяется в полупроводниковой промышленности при производстве диодов и инфракрасных детекторов, а также в качестве присадки к смазочным материалам подшипников скольжения.

Исследования почв аэродрома в г. Крымск выявил, что максимальное загрязнение почв характерно для зон ВВП и рулежных дорожек [Кочеткова и др., 2024]. Во всех точках пробоотбора установлено преобладающее содержание мышьяка и нефтепродуктов; в почвах под траекторией взлета — посадки

самолетов отмечается также характерное повышение содержания продуктов неполного сгорания топлива (нитратного азота, формальдегида).

Для аэродрома в г. Энгельс установлено, что основная масса керосина оседает в почвы на расстоянии от взлетно-посадочной полосы до 300 м, а повышенное содержание несгоревшего топлива фиксируется на расстоянии более 2 км [Лазарев, 2019].

Описывая трансформации абиотической части ЭГС военно-аэродромных комплексов следует сказать о существенных изменениях геофизических полей. Радиолокационные станции навигации самолетов различного функционального назначения, являются мощным источником *электромагнитного воздействия* на биоту и человека. Отмечается, что из всего комплекса физических полей электромагнитной природы целесообразно рассматривать только диапазон частот от 30 кГц до 300 ГГц, как наиболее распространенный, на который приходится наибольшая доля энергетической нагрузки личного состава. Источниками, повышающими уровень ЭМ-фона вокруг летательных аппаратов, могут быть бортовые многофункциональные радиолокационные станции (РЛС): станции управления огнем, обнаружения целей, средства связи, радиоэлектронной борьбы, навигации и др. Наиболее высокий профессиональный риск облучения — у специалистов РЛС, у инженерно-технической службы, личного состава службы ГСМ, аэродромной службы, руководителей полетами, диспетчеров, летного состава. Максимальные уровни воздействия могут достигать до 1,0–2,5 Вт/м². У персонала радиотехнической системы ближней навигации (РСБН) риск в 20 раз меньше [Дроздов, Панихидников, 2013].

Работающие двигатели самолетов являются источниками повышенного *шума* и создают техногенные акустические аномалии. Шум создается тремя основными источниками — турбулентным потоком, двигателем и системами самолета, вызывая профессиональные заболевания [Техногенная трансформация..., 2019]. Причем военные самолеты более шумные, чем гражданские, т.к. у них нет звукоизоляции, двигатели работают в очень шумных режимах.

Эколого-геологические системы военных полигонов. Полигон (учебно-тренировочный комплекс) — это специально отведенный и оборудованный участок суши или моря с воздушным пространством над ним, предназначенный для испытания вооружения и военной техники, проведения мероприятий по боевой подготовке войск (сил флота), исследований в области военного искусства. В России военные полигоны подразделяются по: 1) роду применяемых средств — общевойсковые, ракетные, артиллерийские, авиационные, морские; 2) специальному назначению — научно-исследовательские (испытательные), заводские; 3) подчиненности — центрального подчинения (центральные полигоны), окружные (флотские), ар-

мейские, дивизионные (бригадные), военно-учебных заведений МО РФ.

К первому типу военных полигонов относят также полигоны по утилизации боеприпасов. К научно-исследовательским (испытательным) полигонам относится Новоземельский — крупнейший военный полигон по проведению ядерных испытаний, где техногенные изменения эколого-геологических систем особенно сильны, так как связаны с выпадением на поверхность почв и грунтов радионуклидов.

Особенности абиотических компонентов ЭГС военных полигонов. Особенности литотопа и его техногенной трансформации в технолитотопы сопровождается изменениями геологического строения, рельефа и состава массива, гидрогеологических условий, геодинамического поля, геохимических и геофизических полей.

Трансформация **геологического строения и состава массива грунтов** отмечается при взрывах. В результате взрывов происходит вынос грунта, меняется его структура и физические показатели на расстоянии 15 м от края воронки [Шишкин и др., 2021]. Вокруг эпицентра разрыва снаряда в грунте различают три зоны: сжатия, разрушения и сотрясения. При сжатии грунт сдвигается и уплотняется, при разрушении (имеющем радиус распространения сильной ударной волны) нарушаются связи между частицами грунта, его структура, образуются трещины. Слабая ударная волна вызывает только колебательное движение частиц грунта, без их разрушения.

Характеристики литотопа влияют на степень радиоактивного загрязнения местности, особенно это касается донных отложений. Установлено [Платовских, 2007], что с уменьшением размера частиц донных осадков растет концентрация радионуклида. Изучена неравномерность распределения радионуклидов в донных осадках в зависимости от размеров частиц. Измерения показывают, что во всем диапазоне изменения размеров частиц коэффициент распределения, характеризующий степень сорбции радионуклида частицами, изменяется до 100 раз.

Масштабные изменения **рельефа** происходят при проведении боевых учений на местности. Инженерная подготовка учебных театров военных действий требует возведения многочисленных фортификационных сооружений, протяженных траншей и противотанковых рвов. При этом перемещаются огромные массы грунтов, что создает искусственно расчлененный «военизированный» антропогенный рельеф. Если учесть то, что современные военные учения проводятся на очень больших территориях, то площадь с измененным рельефом может достигать десятков и тысяч квадратных километров. О территориях, на которых наблюдаются подобные изменения, можно судить хотя бы по тому, что артиллерийский полигон, существующий с 1930 г. у г. Нижний Тагил, имеет боевое поле площадью $52 \times 1,5$ км, т.е. 7800 га или 78 км^2 [Руденко, 2002]. Такие территории по окончании учений обладают по-

ниженным качеством геологического пространства, даже при условии их последующей рекультивации.

Существенные изменения **микрорельефа** происходит на военных полигонах по утилизации боеприпасов. Под воздействием взрывов образуются воронки, которые в последствие заполняются водой [Шишкин и др., 2021]. Анализ разброса грунта показал, что центральная часть взрыва подвергается большему воздействию и выбросу на дальнейшее расстояние материнской породы. В рыхлых грунтах воронка выноса близка по форме к параболоиду или усеченному конусу. Так, на полигоне по утилизации артиллерийских снарядов, расположенного в Емельяновском р-не Красноярского края в основании которого залегают пылеватые суглинки, зафиксированы конусообразные воронки, имеющие радиус 8–14 м и глубину 2,5–5 м.

Нарушение природных **гидрогеологических условий**, часто с радиоактивным загрязнением подземных вод, происходит при подземных испытаниях ядерного оружия. Примером техногенной трансформации гидротопы в результате ядерного взрыва в 1974 г. является горный массив, расположенный в 2,5 км от карьера «Удачный» на левом берегу ручья Улахан-Бысытта (Якутия), в котором на глубине 98 м был проведен подземный ядерный взрыв, мощностью 1,7 кт. Взрыв оказался аварийным и на поверхности образовалась воронка диаметром 60 м и глубиной 6 м, которая в последствии была заполнена поверхностными водами. Этот взрыв был выполнен в толще многолетнемерзлых пород, которая, подстилается пластом кембрийских подмерзлотных напорных вод [Вавилов, Неклюдов, 2024]. Вскрытие массива взрывом привело не только к подъему минерализованных рассолов по ослабленным породам канала боевой скважины в диапазоне средне-, верхнекембрийского горизонта, но и латеральному вытеснению трещинно-кавернозно-поровых вод обоих пластов в ранее образованную зону пониженного давления депрессионной воронки 412 карьера «Удачный» и, как результат, была зафиксирована радиоактивность подземных вод в карьере на глубинах 600 м.

В дальнейшем (1992) с целью стабилизации эколого-геологических условий в целом и технолитотопа в частности была проведена рекультивация эпицентральной зоны. Над устьем боевой скважины был насыпан защитный экран из вскрышных пород карьера «Удачный», объемом 433,7 тыс. т. Дополнительно был создан льдогрунтовой слой из намороженных пород толщиной 0,6 м, который для предохранения от таяния в летний период времени был засыпан теплоизоляционным слоем из тех же пород толщиной 3 м. Возведенный саркофаг имел размеры около 150 м в диаметре и 7–20 м по высоте. По данным дешифрирования космоснимков поверхности установлено, что тело саркофага может оказаться уязвимым к перманентному фактору воздействия площадных и склоновых надмерзлотных

вод сезонно талого слоя и дождевых вод, стекающих с прилегающего к саркофагу склона долины.

При испытаниях оружия на военных полигонах происходит трансформация *геодинамического поля*. Испытательные взрывы большой разрушительной силы показали, что существует энергетический порог, за которым оказываемое на верхнюю часть литосферы воздействие может вызывать реакцию массивов горных пород, сходную по проявлению с *тектоническими землетрясениями*. Сопоставление энергетического уровня воздействия с откликом природной среды свидетельствует о том, что ощутимая реакция горных массивов, проявляющаяся в виде обширных экзогенные и эндогенных процессов, носящих зачастую катастрофический характер, возможна при искусственном воздействии, энергия которого превышает 10^8 – 10^{10} Дж [Изменения..., 2006].

Проводившиеся во второй половине XX века подземные испытания ядерных устройств на военных полигонах определили, что существует связь между взрывами атомных зарядов и активизацией геологических процессов. Следует отметить, что в ряде случаев испытания проводились в районах с повышенной сейсмичностью. К таким районам относятся, например, территория полигона в районе оз. Байкал. Данные о подземных ядерных взрывах, проведенных на Семипалатинском, Новоземельском и Невадском полигонах, а также в других местах, позволяют утверждать, что их воздействие на литосферу приводит к кратковременному увеличению сейсмичности на расстоянии до 2000 км от места испытаний, в увеличении частоты и силы землетрясений в первые 5–10 дней, а также через 30–40 дней после проведения взрывов [Природные ..., 2000]. Однако в районе Новоземельского полигона, благодаря слоистому строению массивов, сейсмические колебания на континенте регистрировались только высокочувствительной аппаратурой. Амплитуда сейсмических волн, зарегистрированных на материке после подземных взрывов, была сопоставима с уровнем сейсмического фона. Например, в г. Воркуте амплитуда сейсмического фона, регистрируемого от городского транспорта и промышленных предприятий на частоте 3 Гц, составляет около 10 мкм/с, в то время как сейсмическое воздействие от взрывов составляет 60 мкм/с, т.е. сейсмическое воздействие от ядерных испытаний на Новоземельском полигоне превышает фон всего в 6 раз [Боярский, 2000].

Рассматривая экологические последствия геологических процессов с позитивных и негативных сторон, следует привести мнение А.В. Николаева и А.Д. Жигалина о положительных эффектах от ядерных испытаний в сейсмоактивных районах. С их точки зрения, подземные ядерные взрывы активизируют слабую и умеренную сейсмичность, способствующую сбросу части тектонических напряжений. При этом вероятность возникновения мощных землетрясений с катастрофическими эколо-

гическими последствиями уменьшается [Николаев, Жигалин, 2003].

Существенные трансформации *геохимических полей* происходят при испытании ракетно-космической техники. В первую очередь речь идет о токсичных компонентах ракетного топлива. Расчетное количество компонентов ракетного топлива в отработавших первых ступенях ракет варьирует от сотен килограммов (ракета-носитель «Рокот») до 1,5–2 т (ракета-носитель «Протон»). При этом 30% этой массы остатков осаждается в районе пуска на поверхности литосферы. Наибольшую экологическую опасность представляет ракетное топливо НДМГ⁴, которым заправляют тяжелую российскую ракету-носитель типа «Протон», боевые межконтинентальные ракеты типа 15А18, 15А35, стоящие на боевом дежурстве, а также конверсионные ракеты-носители «Рокот», «Стрела», «Днепр» [Воздействие..., 2016]. Техногенные геохимические аномалии отмечены и при падении на земную поверхность фрагментов космической техники.

Испытания ракетно-космической техники, проводимые в мирное время, нередко вызывают образование продуктов сгорания не только в газовой, но и жидкой фазах. Размер капель на аэрозольных центрах конденсации вырастает до такой степени, что они начинают выпадать в виде кислотных дождей. *Кислотные дожди* особенно опасны на начальных этапах развития растений. При воздействии дождей с pH 3,2 значительно уменьшается масса побегов и корней. Экспериментально установлено, что резкое снижение урожайности редиса до 50–60% отмечается при pH дождя 2,5–3,4 [Заиков и др., 1991].

Подземные ядерные взрывы сопровождаются заметным изменением *геофизических полей*, в том числе *радиоактивного поля*. Длительные (до 10–15 лет) наблюдения показали, что, несмотря на «остеклованные» стенки полостей вследствие воздействия на горные породы высоких температуры и давления во время ядерного взрыва, происходят утечки радиоактивных веществ. При осуществлении взрывов наблюдаются внезапные подвижки грунтового массива, аномальное поведение подземных вод и газов. В случае возникновения нештатных ситуаций при проведении подземных ядерных взрывов, возможен выход на поверхность радиоактивных инертных газов. Мощность дозы радиации в пределах технологических площадок, как это, например, было на Новоземельском полигоне, может достигать 500 Р/ч (5 Зв/ч). Область распространения подобного рода выходов может простирается на расстояния до 500 км и более.

На территориях космодромов в связи с запуском ракет возникают изменения *температурного поля*. Запуски ракет среднего и дальнего радиуса действия

⁴ НДМГ (несимметричный диметилгидразин, гептил) — химическое вещество, производное гидразина, компонент высококипящего ракетного топлива, жидкое горючее из класса органических аминов.

приводят к пожарам на обширных территориях, что влечет за собой изменение температурного режима приповерхностной литосферы. Зажигательные смеси разделяют на три категории — смеси типа напалма (бензин с загустителем), создающие очаги горения длительностью до 10 мин с температурой до 1200 °С, металлизированные зажигательные смеси на основе нефтепродуктов с порошкообразными добавками металлов, температура горения которых достигает 1600 °С, термитные зажигательные смеси (механическая смесь окиси железа и порошкообразного алюминия), горящие без участия в реакции кислорода при температуре до 3000 °С, и низкотемпературные (до 900 °С) смеси в виде воскообразного самовоспламеняющегося вещества с добавкой фосфора и щелочного металла, поражающие огнем местность на площади до 0,15 кв. км [Гринин, Новиков, 2002]. Расчетным путем получены размеры площади пожара от взрыва при взлете ракет-носителей различных типов (табл. 2). Есть случай такого пожара, приведший к гибели людей, например, взрыв на стартовом комплексе МБР Р-16 и последовавший за этим пожар на космодроме Байконур 24.10.1960 привел к гибели 78 человек.

Таблица 2

Характеристики пожаров при взрывах ракет-носителей, по [Воздействие..., 2016]

Тип ракеты	Вид топлива	Масса топлива, т	Энергия взрыва, ТДж	Радиус площади пожара, м
«Ангара» легкого класса	кислород–керосин	1230	1,5	300
«Ангара» среднего класса	кислород–керосин	420	4,8	500
«Протон К»	азотный тетраоксид — несимметричный диметилгидразин	670	4,5	500

При испытании ракетных двигателей и запусках ракет создаются мощные волновые возмущения в широком частотном диапазоне, вызывающие *акустические аномалии*. Уровень звука от работы взлетающей тяжелой ракеты может достигать 150–180 дБ, что в 2–3 раза превышает допустимые для человека уровни [Воздействие..., 2016].

Особенности техноэдафотона. Почвы в районах испытательных полигонов загрязнены различными элементами и соединениями. В результате ядерных испытаний техногенные радионуклиды оседают из воздуха на почвы и донные отложения. Так, на «Опытном поле» Семипалатинского полигона, где производились наземные и воздушные взрывы, на отдельных участках мощность дозы составляет 0,14 мЗв/час (за 10 часов пребывания человека — дозовый предел по нормативам). Более 10-см почвы содержит ²³⁹Pu, что мало пригодно растениям, поэтому

необходимо сохранять целостность почвенного слоя. Однако возможен локальный ветровой перенос ²³⁹Pu. В воде радионуклиды не зафиксированы с 1973 г. (начало систематических исследований). В продуктах питания (в 1964–1966 гг.) ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в областях, прилегающих к Семипалатинскому ядерному полигону, было в 2–5 раз больше, чем в фоновых точках [Геохимические..., 2009].

Особенности биотических компонентов ЭГС военных полигонов. Представители биотических компонентов ЭГС, включая техномикробоценоз, технофитоценоз и технозооценоз испытывают сильные негативные последствия функционирования военных полигонов. Достаточно сказать, что каждый килограмм взрывчатого вещества обычной бомбы вызывает разрушение экосистемы на площади 12,5 м² [Горшков, 1982]. В этом разделе приведены краткие данные по состоянию биотической части ЭГС не только военных полигонов, но и других видов ЭГС оборонно-промышленных комплексов.

Наиболее сильное воздействие на биоту в целом и **микроорганизмы** в частности оказывает ракетное топливо. Известно, что характер воздействия ракетного топлива на микроорганизмы определяется его количеством, поступившем в почвы. При умеренном содержании НДМГ в почвенной среде увеличивается средний объем клеток и биомасса микроорганизмов в единице объема почвы. Численность микроорганизмов различных физиологических и таксономических групп в почвах относительно контроля повышается при загрязнении их НДМГ в концентрациях 1,0; 2,5 и 5,0 г/кг и снижается с увеличением уровня загрязнения от 10 до 100 г/кг [Панова, 1997]. Адаптация к высоким концентрациям НДМГ у микроорганизмов происходит быстро, и уже к концу первого вегетационного сезона (четыре месяца после введения в почву НДМГ) наблюдается активизация их деятельности.

Разлившееся ракетное топливо подавляет **растительность**. Проведенные на космодроме Плесецк исследования биологической активности почв и растительного материала показали, что характер воздействия НДМГ на горох и ячмень определяется его количеством, поступившем в почву. Ингибирующая (подавляющая жизненные процессы) доза НДМГ составляет 20 г/дм³, хотя в умеренных дозах НДМГ служит стимулятором процессов жизнедеятельности растений [Воздействие..., 2016]. Отмечается, что в течение первой фазы вегетации растения ячменя являются более толерантными к воздействию НДМГ, чем растения гороха (рис. 2).

На военных полигонах при ликвидации осколочных боеприпасов образуются фрагменты (первичные осколки), наносящие повреждения всему живому, в том числе и растительности. Чем больше масса осколков, обладающих кинетической энергией за счет действия продуктов взрыва, тем сильнее их поражающее действие и больше дистанция, на которую они летят. Осколки стальной оболочки сохра-

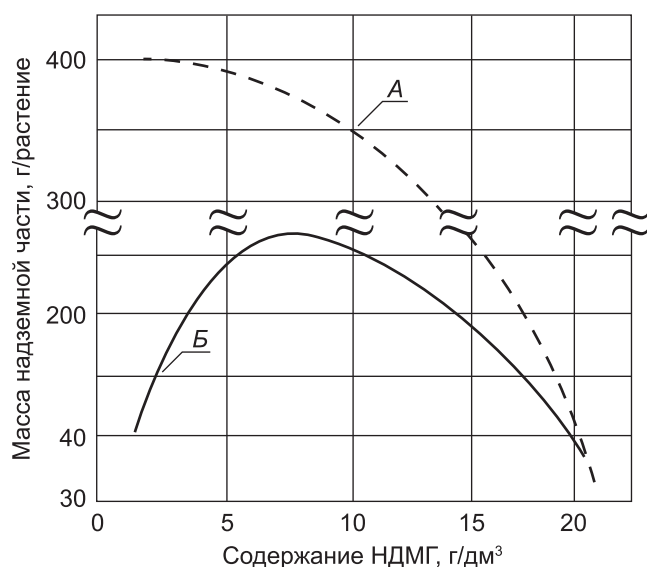


Рис. 2. Биомасса растений гороха (А) и ячменя (Б) в период их созревания (сентябрь) при различном содержании НДМГ в почве [Воздействие..., 2016]

няют поражающую силу на дистанции до 150–250 м от центра взрыва. При утилизации боеприпасов военно-морской базы осколки и пораженные стволы деревьев наблюдались на удалении более 400–500 м от места подрыва [Криминалистика..., 2018].

Радиоактивное загрязнение местности при нештатных ситуациях на военных полигонах отражается на **здоровье человека**. Эффективная доза облучения зависит от перемещения человека по загрязненной территории, от времени пребывания на ней, от вида радионуклидов, их объемной концентрации, плотности загрязнения, уровня загрязнения, от потребления воды и пищи, от орографии местности. Согласно заключению Международной комиссии по радиологической защите вероятность смертельных случаев онкозаболеваний при мощности дозы облучения 1 Зв составляет $5 \cdot 10^{-5}$, что принято за максимальный допустимый риск летального исхода.

При оценке воздействия радиоактивного облучения на организм человека различают внешнее гамма излучение, связанное с последующим поражением кожных покровов, и внутреннее облучение, связанное с потреблением загрязненных пищевых продуктов и вдыханием загрязненного воздуха. Поступление радионуклидов йода приводит к облучению щитовидной железы, радионуклидов бария, стронция и фосфора — к облучению костных тканей, а попадание трития, радионуклидов цинка, марганца и натрия — к дополнительному облучению всего тела человека. Максимальное облучение населения Казахстана и России было зафиксировано после первого испытания на Семипалатинском полигоне 29.08.1949 г., когда воздействию этого фактора на организм человека еще не было изучено. Общая численность облученного населения Казахстана за весь период проведения ядерных испытаний на

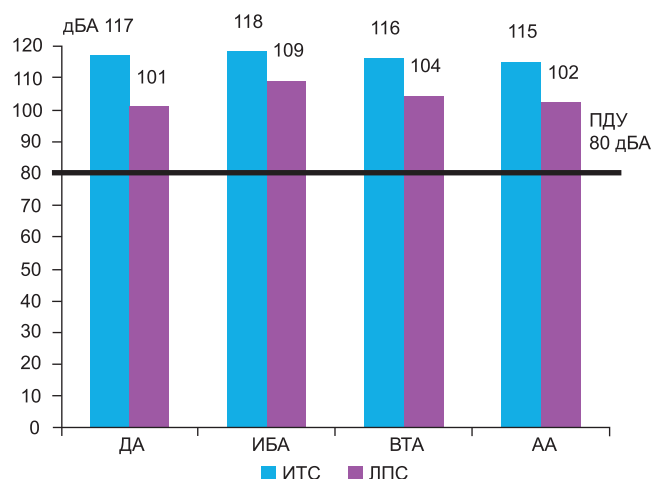


Рис. 3. Эквивалентный уровень звука (дБА) на рабочих местах авиационных специалистов (ИТС — инженерно-технический состав, ЛПС — летно-подъемный состав) по видам авиации в сравнении с предельно допустимым уровнем (ПДУ) [Шешегов, 2017]: ДА — дальняя авиация, ИБА — истребительно-бомбардировочная авиация, ВТА — военно-транспортная авиация, АА — армейская авиация

Семипалатинском полигоне составляет 174 тыс. чел [Ядерные ..., 2008].

При авариях на космодромах компоненты ракетного топлива (гидразиновое горючее, содержащее азотокислители, углеводородное горючее) попадают в акватории, в следствие чего отмечается трансформация представителей **технозооценозов**. Действие нитратов и нитритов на гидробионты заключается в нарушении их кровоснабжения, т.е. транспортировки кислорода к жизненно важным органам. Другой вид негативного влияния нитратов и нитритов на гидробионты заключается в том, что повышение их концентрации в воде водоемов стимулирует рост растительности и планктона и приводит к эвтрофикации, загрязнению воды водоемов азотной кислотой. Смертельная концентрация азотной кислоты для радужной форели через 96 ч. составляет 0,39–1,9 мл/л, для молоди форели через 8 сут. — 0,14–0,15 мг/л [Яржомбек, Михеева, 2007].

При использовании обычного вооружения на военных полигонах наиболее опасны для представителей животных взрывы. Прямое воздействие взрывов на животных проявляется во внутреннем кровоизлиянии и нарушении почечной ткани у мелких млекопитающих, что экспериментально доказано на примере полевых-экономов, обитающих на территории полигона уничтожения боеприпасов в условиях Красноярской лесостепи [Шишкин и др., 2021].

На военных аэродромах совместное действие шума и инфразвука на человека приводит к снижению слуховой чувствительности, сердечно-сосудистым заболеваниям, расстройству центральной нервной системы [Шешегов, 2017]. Установлено, что наиболее неблагоприятной акустической нагрузке среди всех авиационных специалистов подвергается инженерно-технический состав (рис. 3), уровень

шума на их рабочих местах составляет 97–118 дБА в звуковом и 91–111 дБ Лин в инфразвуковом диапазонах. Наиболее интенсивный шум выявлен в истребительно-бомбардировочной авиации. На рабочих местах летно-подъемного состава воздействует шум интенсивностью 96–104 дБА в звуковом и 96–100 дБ Лин в инфразвуковом диапазонах, с наиболее высокими значениями в истребительно-бомбардировочной авиации. Анализ заболеваемости авиационных специалистов по сравнению с аналогичными показателями в контрольной группе показал, что у всех категорий (летчики, штурмана и другие члены летных экипажей) практически в равной степени повышена заболеваемость органа слуха. Причем тугоухость проявляется уже при стаже работы 2 года, и ее вероятность тем выше, выше стаж.

На военных аэродромах неоднократно фиксировались разливы бензина и дизельного топлива, которые снижают качество биоресурсов, и особенно сильно отражаются на состоянии гидробионтов. При разливах топлива образуется углеводородная пленка, нарушающая процесс естественной аэрации воды, что влечет за собой кислородное голодание гидробионтов. При концентрации в водоеме горючих углеводородов более 0,01 мг/л гибнет планктон, а более 50 мг/л — рыба, нарушается, таким образом, трофическая цепочка. Наличие в водоеме нефти в количестве 0,1 мг/л придает рыбе неустрашимый при обработке вкус и запах [Маркизов и др., 2003].

Не менее опасны для гидробионтов и кислотные дожди. Попадание кислотных дождей в закрытые пресные водоемы, когда их ложе не образовано карбонатными породами, вызывает массовую гибель фауны даже при весьма малом повышении кислотности воды (рН 6,5–6,0).

Заключение. Основные виды техногенных воздействий на ЭГС оборонно-промышленных комплексов связаны с изменением рельефа при испытательных взрывах и ликвидации боеприпасов, аварийными утечками нефтепродуктов, загрязнением металлами

и твердыми частицами топлива, особенно территорий, прилегающих к взлетно-посадочным полосам военных аэродромов, а также с загрязнением радионуклидами территорий при наземных ядерных взрывах. Шумовые воздействия трансформируют существующие акустические поля, электромагнитные изменяют существующий фон, а температурные, наблюдаемые при авариях при взлете ракет-носителей, приводят к пожарам на больших площадях.

На примере эколого-геологических систем военно-промышленных комплексов показано, что существенные изменения происходят и в их абиотической и биотической частях: в абиотической части трансформации затрагивают как литосферу так и почвенный покров, формируется технолитотоп и техноэдафотоп; в биотической части ЭГС трансформации затрагивают микробные сообщества, растительность, животных, включая человека, возникают техномикробоценозы, технофитоценозы и технозооценозы, испытывающие сильные негативные последствия военной деятельности.

Показано, что изменения в абиотической части ЭГС оборонно-промышленных комплексов, связанные с загрязнением грунтов и почв ракетным топливом высоких концентраций, приводят к снижению численности микроорганизмов и подавлению жизненных процессов у растений; при радиоактивном загрязнении грунтов и почв при нештатных ситуациях на военных полигонах происходят поражение кожных покровов, внутреннее облучение органов человека, возникают онкозаболевания, при возникновении техногенных акустических аномалий, связанных с работой в истребительно-бомбардировочной авиации, отмечается тугоухость летчиков и инженерно-технического состава, а при возникновении техногенных температурных аномалий зафиксированы случаи гибели людей.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александров В.Н., Емельянов В.И. Отравляющие вещества. М.: Воениздат, 1990. 218 с.

Боярский П.В. Новоземельский полигон: Обеспечение общ. и радиац. безопасности ядер. испытаний: факты, свидетельства, воспоминания / П.В. Боярский, А.И. Веретенников, И.А. Галстян и др. М.: ИздАт, 2000. 487 с.

Вавилов С., Неклюдов В. Исследование участка «Кристалл» методом геоэлектротомографии // Геология и минеральные ресурсы Северо-Востока России: Сборник 14 межд. научно-практ. конф. Новосибирск, 2024. С. 409–413.

Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду / Под ред. В.В. Адушкина, С.И. Козлова, М.В. Сильникова. М.: GEOS, 2016. 795 с.

Геворгян В.М., Пономарева О.И., Кемер О.В. Экологические особенности почвенного покрова аэродромных комплексов гражданской авиации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4 (4). С. 795–798.

Геохимические особенности окружающей среды и здоровье населения Сары-Арки / В.И. Серых, И.В. Глухан, Б.П. Селенко. Министерство образования и науки Респ. Казахстан, Караганд. гос. техн. ун-т. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2009. С.126–127.

Горшков С.П. Экзогеодинамические процессы освоенных территорий. М.: Недра, 1982. 286 с.

Гринин А.С., Новиков В.Н. Экологическая безопасность. Защита территории и населения при чрезвычайных ситуациях. М.: ФАИР-ПРЕСС, 2002. 336 с.

Дроздов В.В., Панихидников С.А. Общая экология с основами экологической безопасности военной деятельности: учебное пособие. СПб.: СПбГУТ, 2013. 432 с.

Дубосаров Ю.В., Зеленцов С.А., Логачев В.А. Хронология ядерных испытаний в атмосфере на Семипалатинском полигоне и их радиационная характеристика // Вестник «Семипалатинский полигон — Алтай». 1994. № 4. С. 18–86.

Заиков Г.Е., Маслов С.А., Рубайло В.Л. Кислотные дожди и окружающая среда. М.: Химия, 1991. 144 с.

Изменение экологических функций литосферы при военных действиях / В.Т. Трофимов, А.Д. Жигалин, Т.А. Барабошкина и др. // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2006. № 5. С. 68–75.

Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Российской Федерации в 2005 г. Вып. 28. М.: Геоинформмарк, 2006. 212 с.

Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Российской Федерации в 2021 г. Вып. 45. М.: Гидроспецгеология, 2022. 423 с.

Королёв В.А., Трофимов В.Т. Систематика эколого-геологических систем. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2025. 120 с.

Кочетова Ж.Ю., Лазарев И.С., Зиброва Н.В., Базарский О.В. Развернутый химический анализ почв и установление приоритетных загрязнителей на территории аэродрома государственной авиации (г. Крымск) // Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 83–90.

Криминалистика: Учеб. для бакалавров / Под ред. Л.В. Бертовского. М.: РГ-Пресс, 2018. 960 с.

Лазарев И.С., Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Бакланов И.О. Мониторинг и прогнозирование загрязнения приаэродромных территорий (на примере г. Энгельс) // Ученые записки РГТМУ. 2019. № 56. С. 126–132.

Логачев В. А. Радиоэкологическая обстановка в регионах Урала после проведения ядерных испытаний в атмосфере // Урал. Радиация. Реабилитация / Отв. ред. В.Н. Чуканов. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. С. 104–127.

Маркизов Н.Ф., Гребенюк А.Н., Баширин В.А. Токсикология нефтепродуктов. СПб.: Невский Диалект, 2003. 128 с.

Николаев А.В., Жигалин А.Д. Геоэкологические аспекты военной деятельности // Геоэкология. 2003. № 1. С. 23–31.

Панова Г.Г. Влияние компонентов ракетного топлива на почвенно-растительную систему: Дисс. ... канд. биол. наук. СПб., 1997. 16 с.

Платовских Ю.А. Радиоактивное загрязнение бухт и заливов Кольского полуострова, Новой Земли и Дальнего Востока // Атомная энергия. 2007. Т. 103, вып. 4. С. 263–268.

Природные опасности России. Сейсмические опасности / Под ред. Г.А. Соболева. М.: КРУК, 2000. 296 с.

Руденко В.Л. Мировая слава секретного полигона // Оборонно-промышленный комплекс Свердловской области: информационно-аналитический каталог. Екатеринбург, 2002. С. 28–30.

Трофимов В.Т., Харькина М.А., Жигалин А.Д., Барабошкина Т.А. Техногенная трансформация экологических функций абиотических сфер Земли под влиянием военной деятельности // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2019. № 1. С. 3–12.

Федоров Л.А. Химическое вооружение — война с собственным народом (трагический российский опыт). Т. 1. Долгий путь к химической войне. М.: Лесная страна, 2009. 392 с.

Химия и жизнь. Атом без грифа «секретно». Кн. 2. М., 1996. С. 132.

Шевырев В.Е. Мониторинг земель приаэродромных и сопредельных территорий Воронежской области: Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Воронеж, 2004. 22 с.

Шешегов П.М. Научное обоснование системы управления риском развития нейросенсорной тугоухости у авиационных специалистов ВВС ВКС при действии авиационного шума: Автореф. дисс. ... докт. мед. наук. Волгоград, 2018. 44 с.

Шишикин А.С., Пономарева Т.В., Ефимов Д.Ю. и др. Воздействие утилизации боеприпасов на лесные экосистемы // Сибирский журнал. 2021. № 2. С. 17–31.

Ядерные взрывы в СССР и их влияние на здоровье населения Российской Федерации / Кол. авторов под рук. В.А. Логачева. М.: ИздАТ, 2008. 470 с.

Яржомбек А.А., Михеева И.В. Ихтиотоксикология. М.: Колос, 2007. 144 с.

Статья поступила в редакцию 15.08.2025,
одобрена после рецензирования 12.11.2025,
принята к публикации 27.02.2026