

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 504.05

П.П. Кречетов¹, Т.В. Королева², О.В. Черницова³ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ КОСМОДРОМА БАЙКОНУР
И ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ К ТЕХНОГЕННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ⁴

Исследован почвенный покров космодрома Байконур. На основе полевых и химико-аналитических исследований, а также данных дистанционного зондирования актуализирована среднемасштабная почвенная карта космодрома (1:300 000). Выполнена оценка устойчивости почв к химическому и физическому воздействию, оказываемому при осуществлении ракетно-космической деятельности, и на ее основе — зонирование территории космодрома Байконур по потенциальной устойчивости почв.

Показано, что интегральная оценка потенциальной устойчивости почв к химическому загрязнению складывается из реализации буферных механизмов физико-химических свойств почв и каталитической активности химических элементов. На почвах с низкой потенциальной устойчивостью к химическому воздействию размещено примерно 65% производственных объектов космодрома Байконур. Учет этих данных необходим при определении мероприятий по минимизации экологических рисков, а также при разработке методик детоксикации почвенного покрова в случае возникновения нештатных ситуаций.

Проанализированы факторы, влияющие на устойчивость почв к физическому воздействию. Большинство объектов космодрома (85%) расположено на территориях, природные почвы которых обладают средней устойчивостью к физическому воздействию; 15% объектов — на участках с почвами, характеризующимися низкой устойчивостью к физическому воздействию. Соблюдение на объектах космодрома экологических требований к определенным видам работ позволит снизить масштабы антропогенной трансформации природных ландшафтов на прилегающих к ним территориях.

Ключевые слова: устойчивость, почвы, компоненты ракетного топлива, НМДГ, космодром Байконур, экосистема, химическая устойчивость, физическая устойчивость.

Введение. Космодром Байконур, площадь которого составляет ~650 тыс. га, расположен на слабоболнистой щебнистой суглинисто-супесчаной равнине в пределах пластово-останцового плато Дарьялык [Ботаническая..., 2003]. При общем природном однообразии на плато отчетливо прослеживается мозаичность почвенно-литологических условий, выраженная в наличии суглинистых, щебнистых, супесчаных участков и небольших изолированных массивов закрепленных песков. Физико-географические особенности территории определяют исходное разнообразие почв и разную степень их устойчивости к техногенным воздействиям.

На территории космодрома находится г. Байконур (~0,6% площади космодрома), размещено несколько производственных площадок с объектами, участвующими в цикле подготовки ракетной техники и пуске ракет-носителей, а также расположены административно-хозяйственные сооружения. В целом все объекты космодрома представляют собой источники разнообразного техногенного

воздействия — механического, химического, акустического и электромагнитного [Кондратьев и др., 2008]. Значительные участки территории (более 98% площади) — природные экосистемы, которые в той или иной степени подвержены этому воздействию.

Под устойчивостью экосистем к техногенному воздействию авторы понимают их свойство сохранять, а также восстанавливать (с учетом непрерывно идущего эволюционного процесса) свое естественное состояние и функционирование, несмотря на разнообразные (физические, химические, биологические) внешние воздействия. Устойчивость наземных экосистем определяется двумя основными факторами: чувствительностью растительности к антропогенному воздействию, или биологической устойчивостью, рассмотренной авторами применительно к космодрому Байконур ранее [Неронов и др., 2012], и буферными свойствами основного средообразующего компонента наземных экосистем — почв.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, доцент, канд. биол. н.; *e-mail:* krechetov@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, зав. лабораторией экологической безопасности, канд. геогр. н.; *e-mail:* korolevat@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с.; *e-mail:* olchernitsova@mail.ru

⁴ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-27-00083).

За основу оценки устойчивости почв космодрома Байконур к техногенному воздействию взята методика экспертной балльной оценки [Букс, 1987; Глазовская, 1994; Кречетов, 2008; Снакин и др., 1995]. В основе такой оценки лежит учет показателей, характеризующих способность экосистем к самоочищению от продуктов загрязнения или снижению их токсичности за счет перехода в биологически недоступные формы (химическая устойчивость), а также устойчивость литологической основы к механическим воздействиям (физическая устойчивость). К достоинствам методики экспертной балльной оценки следует отнести возможность учесть многообразие факторов, влияющих на устойчивость почв, и их вклад в общую оценку; к недостаткам — субъективизм, присущий экспертным оценкам.

Материалы и методы исследований. Изучение почвенного покрова космодрома проводится с 2002 г. в рамках системы экологического мониторинга ракетно-космической деятельности. На территории космодрома в основных типах экосистем расположены точки мониторинговых наблюдений, в которых заложены почвенные разрезы. Ежегодно в этих точках проводится опробование почв для наблюдения за химическими и физическими показателями.

Помимо этих данных для оценки потенциальной устойчивости почв к техногенному воздействию использованы результаты проведенного авторами полевого маршрутного исследования современного состояния почвенного покрова космодрома, в ходе которого заложено несколько линейных профилей. В 180 маршрутных точках определена плотность почвы ненарушенного сложения, отобраны пробы почвы, выполнены почвенные и геоботанические описания.

По данным геоботанических исследований территория космодрома Байконур принадлежит к восточной окраине Западно-Северотуранской подпровинции Северотуранской провинции Сахаро-Гобийской пустынной области [Ботаническая..., 2003] и целиком находится в подзоне средних пустынь. Анализ распределения корневых систем растений в точках мониторинга показал, что их основная масса сосредоточена в слое 5–10 см. Кроме того, на поверхности функционируют водорослевые и лишайниковые сообщества, которые в случае воздействия компонентов ракетного топлива (КРТ) будут нарушены в первую очередь, поэтому отбор смешанных образцов почв проводили из биологически активного слоя — с глубины 0–10 см. Сравнительный анализ вещественного состава и химических свойств этого почвенного горизонта с нижележащими показал, что поверхностные слои, как правило, характеризуются наименьшими буферными свойствами по отношению к антропогенному воздействию и, следовательно, отражают реальную устойчивость почв.

Полученные полевые данные, а также дешифрирование многозональных космических снимков Landsat ETM+ с разрешением 30 м позволили уточ-

нить составленную ранее карту почвенного покрова космодрома Байконур и создать на ее основе карты устойчивости почв к химическому и физическому воздействию.

С учетом данных об особенностях воздействия ракетно-космической деятельности на окружающую среду [Касимов и др., 2011] и факторов, определяющих буферность почв к воздействию несимметричного диметилгидразина (НДМГ) [Кречетов и др., 2014], предложен набор показателей, характеризующих потенциальную устойчивость почв космодрома Байконур к химическому и физическому воздействию. В отобранных почвенных пробах определены следующие показатели: полевая влажность, гранулометрический состав, рН, содержание гумуса, электропроводность, содержание солей, валовое содержание меди, железа, марганца (табл. 1). Фактические данные по показателям, выбранным для итоговой оценки, преобразованы в баллы от 1 (низкая устойчивость) до 3 (высокая устойчивость). Баллы для почв по группам показателей просуммированы и вновь преобразованы в трехбалльную шкалу. В результате получены таблицы с оценкой потенциальной устойчивости почв к химическому и физическому воздействию (табл. 2, 3).

Результаты исследований и их обсуждение. Исследования показали, что территория космодрома характеризуется значительной комплексностью почвенного покрова, что в целом свойственно пустынно-степным регионам. На большей части исследованной территории распространены зональные серо-бурые пустынные почвы супесчаного и легкосуглинистого состава. На породах тяжелого гранулометрического состава формируются бурые почвы, часто с признаками солонцеватости. К песчаным массивам приурочены пустынные песчаные и серо-бурые песчаные почвы. В комплексе с зональными почвами встречаются пятна такыров и солончаков. Значительные площади заняты такыровидными засоленными почвами, приуроченными к депрессиям, выполненным глинистыми и суглинистыми отложениями (рис. 1). Почвы долины р. Сырдарья (аллювиально-луговые и солончаки) существенно отличаются, они несут в себе черты современного или прошлого повышенного гидроморфизма.

Серо-бурые почвы развиты на повышенных элементах рельефа с ровной или слабоволнистой поверхностью на легкосуглинистых и супесчаных отложениях под различными вариантами белоземельнопопынных растительных сообществ. В гранулометрическом составе почв преобладают песчаные фракции с частицами >0,05 мм. В некоторых случаях содержание крупного песка достигает 25–26%. Несмотря на относительно легкий гранулометрический состав, все горизонты этих почв плотные (за исключением верхнего).

Изученные серо-бурые почвы на глубине могут содержать до 15–20% гипса. Такое скопление гипса в процессе почвообразования обусловлено

Таблица 1
Химические и физические свойства почв (среднее \pm стандартное отклонение)

Почва	Влажность, %	Содержание фракции <0,01 мм, %	Плотность, г/см ³	pH	Гумус, %	MnO, мг/кг	Fe ₂ O ₃ , %	Ca, мг/кг	n*
Бурая солонцеватая суглинистая	6,13 \pm 2,87	21 \pm 16,17	1,4 \pm 0,12	8,65 \pm 0,60	<0,5	623 \pm 305	3,08 \pm 1,15	40,96 \pm 13,36	21
Серо-бурая песчаная и супесчаная	1,54 \pm 0,90	7 \pm 2,92	1,5 \pm 0,07	8,53 \pm 0,42	<0,5	606 \pm 161	2,61 \pm 0,73	36,65 \pm 9,40	33
Серо-бурая суглинистая щебнистая	4,22 \pm 1,35	28 \pm 16,05	1,4 \pm 0,08	8,68 \pm 0,56	<0,5	520 \pm 215	3,18 \pm 2,27	41,12 \pm 14,75	32
Такыр и такыровидная суглинистая солонцевато-солончаковая	17,11 \pm 5,10	32 \pm 11,54	1,5 \pm 0,10	9,17 \pm 0,50	<0,5	678 \pm 388	6,64 \pm 1,54	51,24 \pm 21,00	10
Такыр глинистый	21,11 \pm 7,38	79 \pm 18,81	1,8 \pm 0,21	9,03 \pm 0,38	<0,5	900 \pm 552	6,40 \pm 1,09	53,92 \pm 19,81	17
Аллювиально-луговая супесчаная и суглинистая	10,12 \pm 4,32	30 \pm 19,25	1,4 \pm 0,08	8,5 \pm 0,55	3,45 \pm 1,32	564 \pm 148	3,2 \pm 1,89	41 \pm 12,43	5
Солончак такыровидный	13,59 \pm 5,26	12 \pm 4,31	1,5 \pm 0,08	8,90 \pm 0,21	<0,5	901 \pm 177	4,78 \pm 0,83	68,79 \pm 15,67	5
Солончак	12,59 \pm 6,56	29 \pm 30,57	1,5 \pm 0,06	8,40 \pm 0,23	<0,5	507 \pm 283	4,16 \pm 1,88	59,64 \pm 12,37	5
Песчаная пустынная	1,06 \pm 0,69	6 \pm 2,58	1,5 \pm 0,08	7,9 \pm 0,71	<0,5	388 \pm 117	1,33 \pm 0,54	22,64 \pm 7,75	12
Серо-бурая суглинистая в комплексе с серо-бурой суглинистой солонцеватой и солончаковой	5,13 \pm 3,03	64 \pm 31,76	1,6 \pm 0,08	8,64 \pm 0,34	<0,5	561 \pm 175	2,66 \pm 1,45	42,28 \pm 11,40	40

* n — число точек.

Таблица 2

Интегральная оценка потенциальной устойчивости почв к химическому загрязнению

Почва	Балльная оценка*										Сумма баллов	Степень устойчивости
	физические и химические свойства почв					каталитическая активность почв						
	содержание фракции <0,01 мм	плотность	рН	гумус	MnO	Fe ₂ O ₃	Cu	физические и химические свойства почв				
								каталитическая активность почв				
Бурая солонцеватая суглинистая	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	16	2
Серо-бурая песчаная и супесчаная	3	2	3	3	2	2	2	2	2	2	17	3
Серо-бурая суглинистая щебнистая	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	16	2
Такыр и такыровидная суглинистая солонцевато-солончаковая	2	2	3	3	2	2	3	2	2	3	17	3
Такыр глинистый	1	1	3	3	3	3	3	3	2	2	16	2
Аллювиально-луговая супесчаная и суглинистая	2	2	3	1	2	2	2	2	2	2	14	1
Солончак такыровидный	3	2	3	3	3	3	3	3	2	2	19	3
Солончак	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	17	3
Песчаная пустынная	3	2	3	3	1	1	1	1	1	1	14	1
Серо-бурая суглинистая в комплексе с серо-бурой суглинистой солонцеватой и солончаковой	1	1	3	3	2	2	2	2	2	2	14	1

* Количественные критерии балльных оценок приведены в табл. 4.

Таблица 3

Интегральная оценка потенциальной устойчивости почв к физическому (механическому) воздействию

Почва	Балльная оценка физических свойств почв*			Сумма баллов	Степень устойчивости
	содержание фракции <0,01 мм	плотность	влажность		
Бурая солонцеватая суглинистая	2	2	2	6	2
Серо-бурая песчаная и супесчаная	1	2	1	4	1
Серо-бурая суглинистая щебнистая	2	2	1	5	1
Такыр и такыровидная суглинистая солонцевато-солончаковая	2	2	3	7	2
Такыр глинистый	3	3	3	9	3
Аллювиально-луговая супесчаная и суглинистая	2	2	2	6	2
Солончак такыровидный	1	2	3	6	2
Солончак	2	2	3	7	2
Песчаная пустынная	1	2	1	4	1
Серо-бурая суглинистая в комплексе с серо-бурой суглинистой солонцеватой и солончаковой	3	3	1	7	2

* Количественные критерии балльных оценок приведены в табл. 4.

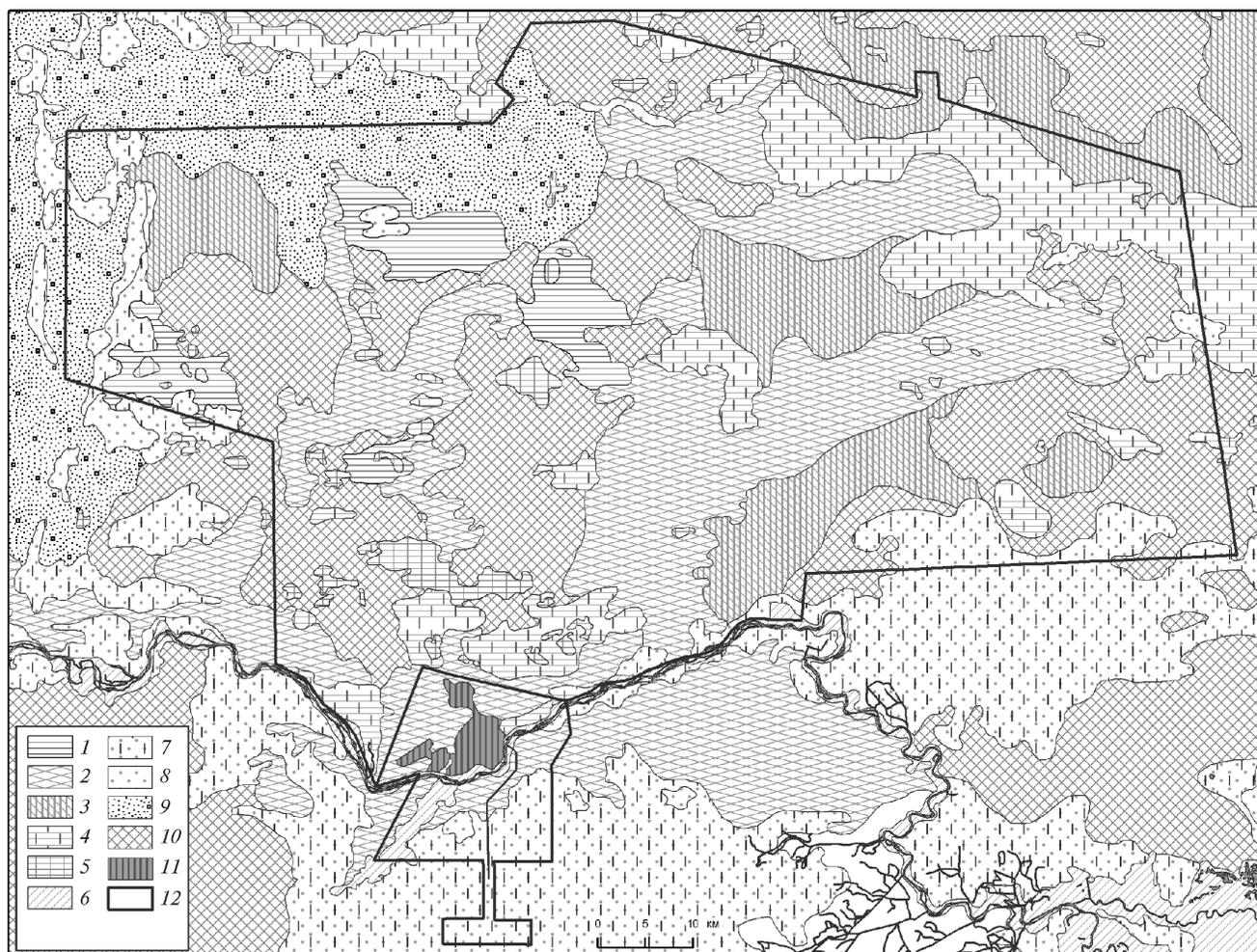


Рис. 1. Почвенная карта космодрома Байконур. Почвы: 1 — бурые солонцеватые суглинистые; 2 — серо-бурые песчаные и супесчаные; 3 — серо-бурые суглинистые щебнистые; 4 — такыры и такыровидные суглинистые солонцевато-солончаковатые; 5 — такыры глинистые; 6 — аллювиально-луговые супесчаные и суглинистые солонцевато-солончаковатые; 7 — солончаки такыровидные; 8 — солончаки; 9 — песчаные пустынные; 10 — серо-бурые суглинистые в комплексе с серо-бурыми суглинистыми солонцеватыми и солончаковатыми; 11 — территория г. Байконур; 12 — граница космодрома Байконур

химическим составом почвообразующих пород, которые здесь представлены отложениями палеоген-неогенового возраста, богатыми солями, особенно сульфатами кальция. Серо-бурые почвы, как правило, хлоридов содержат в 2–3 раза меньше, чем сульфатов. Максимум щелочности наблюдается в верхних горизонтах. Наибольшее количество карбонатов также отмечено в верхних горизонтах и постепенно убывает вниз по профилю. Выделение карбоната кальция в виде белесоватых выцветов обнаруживается обычно с глубины 10–20 см.

Серо-бурые почвы содержат <0,5% гумуса, при этом его содержание убывает вниз по профилю. Емкость поглощения этих почв достигает 10–15 ммоль(+)/100 г почвы. Из поглощенных оснований доминирует кальций (60–80%). В иллювиальном горизонте несколько возрастает роль магния и натрия, что придает этим почвам признаки солонцеватости.

Бурые почвы формируются на отложениях палеоген-неогенового и четвертичного возраста на относительно пониженных элементах рельефа или на платообразных возвышениях под белоземельной

полянью и биюргуном. По гранулометрическому составу преобладают средне- и тяжелосуглинистые почвы с разной степенью щебнистости. Верхние горизонты, за редким исключением, бедны илом, что обусловлено выносом последнего в нижележащие горизонты. В солонцеватых почвах выявлено накопление илистой фракции (<0,001 мм) в иллювиальном горизонте. Количество гумуса не превышает 0,5%. Верхний горизонт беден легкорастворимыми солями (0,1–0,2%), вниз по профилю количество солей резко увеличивается. В иллювиальном горизонте наблюдается некоторое увеличение органического вещества. Реакция почвенной суспензии в бурых солонцеватых почвах нейтральная или слабощелочная, величина pH в верхнем горизонте колеблется в сравнительно узком интервале (7,8–8,7). С глубиной значение pH, как правило, возрастает. Среди поглощенных оснований ведущее место занимает кальций. Содержание поглощенного натрия в солонцеватом горизонте составляет 15–17% от емкости поглощения.

Солончаки представлены в основном солончаками типичными (пухлыми и корково-пухлыми) и

солончаками такыровидными. Как правило, они приурочены к выходам засоленных пород или древним речным террасам. Растительность представлена однолетне- и многолетнесолянковыми, галофитнозлаковыми и галофитнопопынными сообществами. Солончаки на территории космодрома имеют пухлую или корково-пухлую поверхность с обильными выцветами солей, которые образуют бородавчатую хрупкую корочку с содержанием солей до 45%. До глубины 1,5 м содержание солей, как правило, не опускается ниже 2–3%; по химизму засоление преимущественно хлоридно-сульфатно-натриевое. Содержание гумуса в большинстве случаев не превышает 0,5%. Реакция среды от слабо- до сильнощелочной.

Такыры и такыровидные почвы формируются в условиях периодического застоя вод в условиях бессточных поверхностей, сложенных суглинками и глинами под полынно-бюргуновой растительностью. На лишенных высшей растительности участках распространены слоевищные (водорослевые и лишайниковые) группировки. Такыры и такыровидные почвы характеризуются незначительной гумусностью, солонцеватостью и солончаковатостью. По всему профилю встречаются карбонаты. Такыры отличаются наличием гладкой и плотной поверхностной корочки, разбитой трещинами усыхания. Они формируются на отложениях тяжелого гранулометрического состава и поэтому обладают низкой фильтрационной способностью. Ниже корочки залегает слоево-чешуйчатый горизонт буроватого цвета, глубже — плотные породы, мало измененные почвообразованием. Количество гумуса составляет 0,3–0,6%, pH 8,5–9,7, емкость поглощения 5–10 ммоль(+)/100 г почвы.

Засоление у такыров пестрое. Типичные такыры имеют сульфатно-хлоридно-натриевый тип засоления по всему профилю (0,3–0,8% солей) с солевым максимумом (3%) на поверхности. Менее засоленные почвы имеют опресненную корочку (0,2–0,3%) и максимум солей (0,9–1,3%) на глубине 15–35 см; вниз по профилю содержание солей составляет 0,3–0,8%.

Такыровидные почвы формируются на четвертичных аллювиальных, преимущественно пылеватых отложениях. Для них характерны пористая корочка, слоево-чешуйчатый подкорковый слой, микроагрегированность, повышенная щелочность в поверхностном горизонте, хлоридно-сульфатно-натриевый тип засоления. Гумуса в этих почвах <0,5%.

Песчаные почвы отличаются слабой дифференциацией профиля. Растительность представлена белоземельнопопынниками с включениями дерновинных злаков (ковыль прикаспийский и житняк ломкий). Встречаются незасоленные и засоленные варианты. Содержание гумуса в них варьирует от 0,3 до 0,5%, реакция среды слабощелочная, емкость поглощения невысокая, не более 5 ммоль(+)/100 г почвы.

Аллювиально-луговые почвы распространены в долине р. Сырдарья и формируются на слоистом и неоднородном по гранулометрическому составу пойменном аллювии под галофитно-луговой и галофитно-кустарниковой растительностью. Грунтовые воды залегают на глубине 1–3 м, они преимущественно пресные, реже слабосоленые сульфатно-натриевого состава. Иногда встречаются варианты этих почв, засоленные с поверхности. Содержание гумуса не превышает 3,5%, емкость катионного обмена варьирует в зависимости от гранулометрического состава.

Потенциальная устойчивость почв к химическому воздействию. При оценке устойчивости почв космодрома Байконур к химическому воздействию авторы прежде всего рассматривали устойчивость к загрязнению наиболее опасным экотоксикантом ракетно-космической деятельности — НДМГ, относящимся к 1-му классу опасности. НДМГ обладает высокой летучестью, хорошо адсорбируется на различных поверхностях, легко испаряется и десорбируется, смешивается с водой практически в любых соотношениях, т.е. это мобильный токсикант, легко мигрирующий в любых компонентах экосистем. При поступлении на поверхность почвы НДМГ и продукты его трансформации могут вымываться из почвы атмосферными водами, попадать в открытые водоемы, мигрировать в подземные водоносные слои, вторично загрязнять атмосферный воздух, поступая с пылью и испаряясь из почвы, а также мигрировать по пищевым цепям.

Окислительно-восстановительный режим почв, за исключением почв гидроморфного ряда, характеризуется преобладанием окислительных условий по всему профилю, что приводит к окислительной трансформации НДМГ. Окисление НДМГ в почве — сложный процесс, включающий серию последовательно-параллельных реакций. Проведена достоверная идентификация 12 продуктов трансформации НДМГ в почвах методами ядерного магнитного резонанса, жидкостной и газовой хромато-масс-спектрометрии [Буряк и др., 2004; Родин и др., 2008; Родин и др., 2009; Родин и др., 2012; Kenessov et al., 2008]. Так, попадая в окружающую природную среду, НДМГ может частично трансформироваться в N-нитрозоамины, в том числе нитрозодиметиламин (НДМА), обладающий выраженными канцерогенными свойствами. Экспериментальными исследованиями установлено, что большинство продуктов трансформации (за исключением НДМА) обладают существенно меньшей токсичностью по сравнению с самим НДМГ [Смоленков и др., 2013].

Исходя из особенностей поведения НДМГ в почвах в итоговые показатели, использованные для оценки потенциальной устойчивости почв к химическому воздействию, включены гранулометрический состав почвы (%); плотность почвы (г/см³); величина pH; содержание гумуса (%); содержание катионов меди, железа, марганца (табл. 1). Балльная

оценка выполнена в два этапа — отдельно для физических и химических свойств почвы и для каталитической активности почвы, затем определен интегральный балл оценки потенциальной устойчивости почв к химическому воздействию.

Гранулометрический состав почвы — один из основных факторов, влияющих на степень сорбции НДМГ, т.е. чем выше площадь поверхности частиц, тем больше степень поглощения НДМГ и, следовательно, удержание его в почвенном профиле в биологически доступном состоянии. При легком гранулометрическом составе степень сорбции мала, что дает возможность выноса НДМГ в глубь профиля за пределы корнеобитаемого слоя, поэтому почвам с низким содержанием физической глины присвоен максимальный балл устойчивости к загрязнению (3). В почвах с тяжелым гранулометрическим составом с высокой сорбционной емкостью НДМГ концентрируется в поверхностном горизонте почвы — почвам, где частиц размером <0,01 мм больше 60%, присвоен минимальный балл устойчивости к химическому загрязнению (1).

На фильтрационные свойства почв сильно влияет увеличение их плотности. В целом почвы космодрома Байконур характеризуются высокой плотностью поверхностных горизонтов (1,4–1,5 г/см³). Большинству почв присвоен средний балл устойчивости (2). Несколько выше плотность у серо-бурых суглинистых почв в комплексе с серо-бурыми суглинистыми солонцеватыми и солончаковатыми, а также у такыров глинистых (1,6–1,8 г/см³); поэтому этим почвам присвоен минимальный балл устойчивости (1).

На устойчивость НДМГ в почве существенно влияют ее кислотно-основные свойства. В кислой среде НДМГ находится в протонированной форме, имеет положительный заряд и способен закрепляться в почвенном поглощающем комплексе. В нейтральной и в щелочной среде НДМГ находится в электронейтральной форме, поэтому он плохо сорбируется почвенными частицами и мигрирует в водном растворе. По кислотно-основным свойствам почвы космодрома Байконур не дифференцируются, для них характерна щелочная реакция среды. Поэтому при проведении балльной оценки всем почвам космодрома присвоен максимальный балл устойчивости к загрязнению НДМГ (3).

Поскольку НДМГ способен реагировать с карбоксильной группой, он образует соединения с органическими кислотами почв, а также связи с угольной кислотой. В работах [Кречетов и др., 2014; Экологические..., 2000] установлена прямая зависимость поглощения НДМГ от содержания в почве органических веществ. Однако почвы космодрома малогумусные, что не способствует накоплению в них НДМГ. Всем почвам, за исключением аллювиально-луговой супесчаной и суглинистой, также присвоен максимальный балл устойчивости к химическому загрязнению (3).

Интегральная оценка исследованных почв по всем предложенным показателям позволила выделить три группы — с суммой баллов 8, 10 и 11 из 12 возможных, что позволяет говорить о том, что все почвы космодрома обладают достаточно высокой (выше средней) потенциальной устойчивостью к химическому воздействию.

Как установлено экспериментальными исследованиями [Елизарова и др., 1998; Ушакова и др., 2004], многие металлы (Cu^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+}) проявляют каталитическое действие и ускоряют процесс окисления НДМГ в почвах. Кроме того, по данным [Братков и др., 1987], оксиды металлов катализируют разложение гидразиновых горючих веществ более активно, чем ионы. В условиях аридных ландшафтов в большинстве почв значительная часть этих металлов присутствует в оксидных пленках на поверхности минералов.

Оценка каталитической активности почв космодрома показала, что почвы космодрома можно отнести к трем группам — с суммой баллов 3, 6 и 7–8 из 9 возможных. Минимальной каталитической активностью перечисленных выше химических элементов (сумма баллов 3) обладают песчаные пустынные почвы. Остальные почвы космодрома оценены как почвы со средней и высокой каталитической активностью (табл. 1, 2).

В целом почвы автономных ландшафтов космодрома Байконур с легким гранулометрическим составом по кислотно-основным и окислительно-восстановительным условиям имеют благоприятную среду для окисления и миграции НДМГ с поверхностным и внутриспочвенным стоком. На участках, сложенных водоупорными глинами и суглинками с солонцеватыми почвами и солончаками, проникновение НДМГ в почвенную толщу затруднено, что создает условия для его накопления в верхних горизонтах почв и миграции с поверхностным стоком в местные депрессии.

Однако, учитывая особенности геоморфологического строения территории космодрома — чередование плоских пространств с бессточными понижениями в виде логов и впадин с солончаками, а также небольшое количество осадков (100–120 мм/год), — можно утверждать, что вероятность латеральной миграции загрязнителей в подчиненные экосистемы невелика из-за отсутствия достаточного поверхностного стока.

Интегральная балльная оценка потенциальной устойчивости почв космодрома Байконур к химическому загрязнению позволила разделить почвы космодрома на три группы — с суммой баллов 14, 16 и >16. По увеличению степени устойчивости они образуют следующий ряд (рис. 2): серо-бурая суглинистая в комплексе с серо-бурой суглинистой солонцеватой и солончаковатой, аллювиально-луговая супесчаная и суглинистая, песчаная пустынная → бурая солонцеватая суглинистая, серо-бурая суглинистая щебнистая, такыр глинистый → серо-бурая песчаная и супесчаная, солончак, такыр

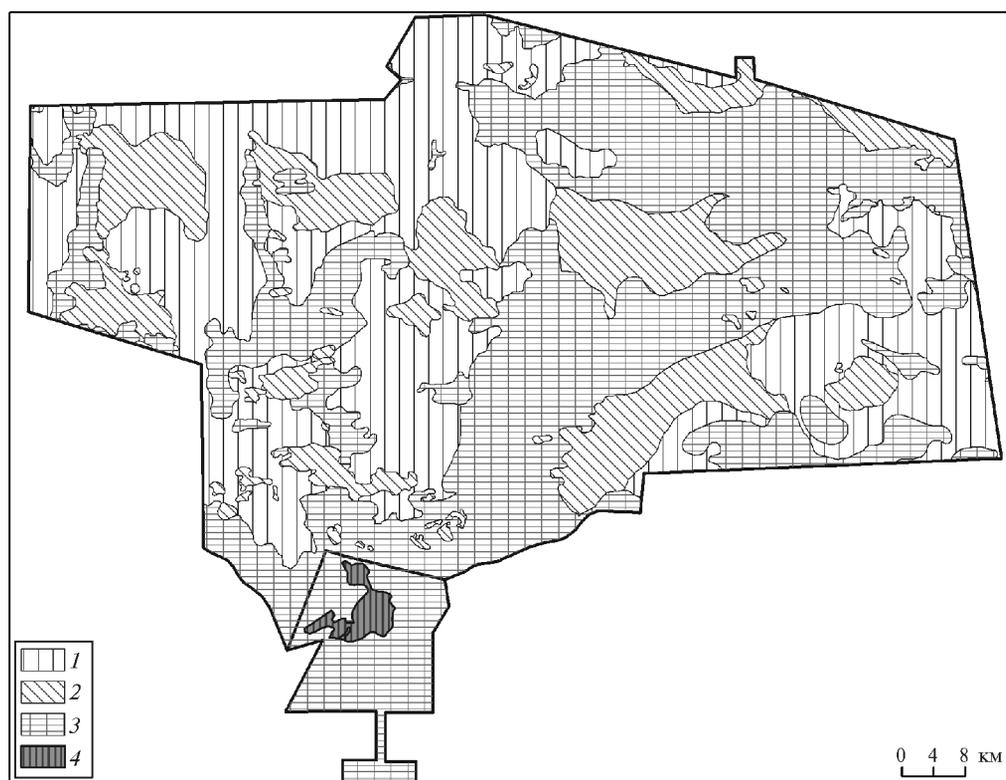


Рис. 2. Устойчивость почв к химическому воздействию: 1 — низкая, 2 — средняя, 3 — высокая; 4 — территория г. Байконур

и такыровидная суглинистая солонцевато-солончаковая, солончак такыровидный.

В целом малоустойчивые к химическому воздействию почвы занимают 37% территории космодрома, почвы со средней устойчивостью — 19%; с высокой устойчивостью — 44%.

Потенциальную устойчивость почв к физическому воздействию в первую очередь необходимо оценивать с точки зрения вероятности усиления развития процессов ветровой и водной эрозии в результате антропогенного воздействия, определяемой комплексом факторов. В аридной зоне основной деградационный процесс — ветровая эрозия, развитию которой на космодроме способствует уничтожение естественной растительности в результате антропогенной деятельности (строительство дорог, разработка карьеров, движение автомобильного транспорта вне основных дорог, строительство промышленных объектов на площадках космодрома и т.п.). Техногенно нарушенные растительные сообщества занимают около 5% площади космодрома [Неронов и др., 2012]. Интенсивная хозяйственная деятельность приводит к появлению незакрепленных, часто подвижных песков. Подтверждается широкое развитие процессов дефляции на космодроме наличием у большинства автоморфных почв тонкого (до 5 см) навейного песчаного слоя (чехла). Еще один дефляционный процесс, характерный для почв космодрома, — усиление эолового выноса солей и засоление территории в результате разрушения солевой корочки на поверхности засоленных почв.

Водная эрозия на космодроме в силу небольшого годового количества осадков менее значимый деградационный процесс. Существенно она проявляется лишь на крутых склонах останцов, где почвенный покров, представленный маломощными бурыми пустынными почвами, местами полностью уничтожен под действием талых вод, и на поверхности выходят коренные породы.

Наиболее существенные факторы, влияющие на потенциальную устойчивость почв к физическому воздействию, — гранулометрический состав почвы, ее плотность и полевая влажность. Наиболее устойчивы к физическому воздействию почвы с тяжелым гранулометрическим составом и высокой плотностью. На устойчивость к дефляции сильно влияет сезонное увлажнение почв. Оценка полевой влажности почв показала, что минимальная влажность, а следовательно, и минимальная устойчивость к дефляции характерна для почв с легким гранулометрическим составом — песчаных пустынных и серо-бурых песчаных и супесчаных почв. Максимальная полевая влажность присуща такырам и солончакам, которые в наибольшей степени устойчивы к физическому воздействию.

По аналогии с оценкой потенциальной устойчивости почв к химическому воздействию выполнена экспертная балльная оценка потенциальной устойчивости почв к физическому воздействию (табл. 3, 4, рис. 3). Почвы космодрома образуют следующий ряд от малоустойчивых до устойчивых к физическому воздействию: песчаная пустынная, серо-бурая песчаная и супесчаная, серо-бурая суглинистая щебнистая → бурая солонцеватая су-

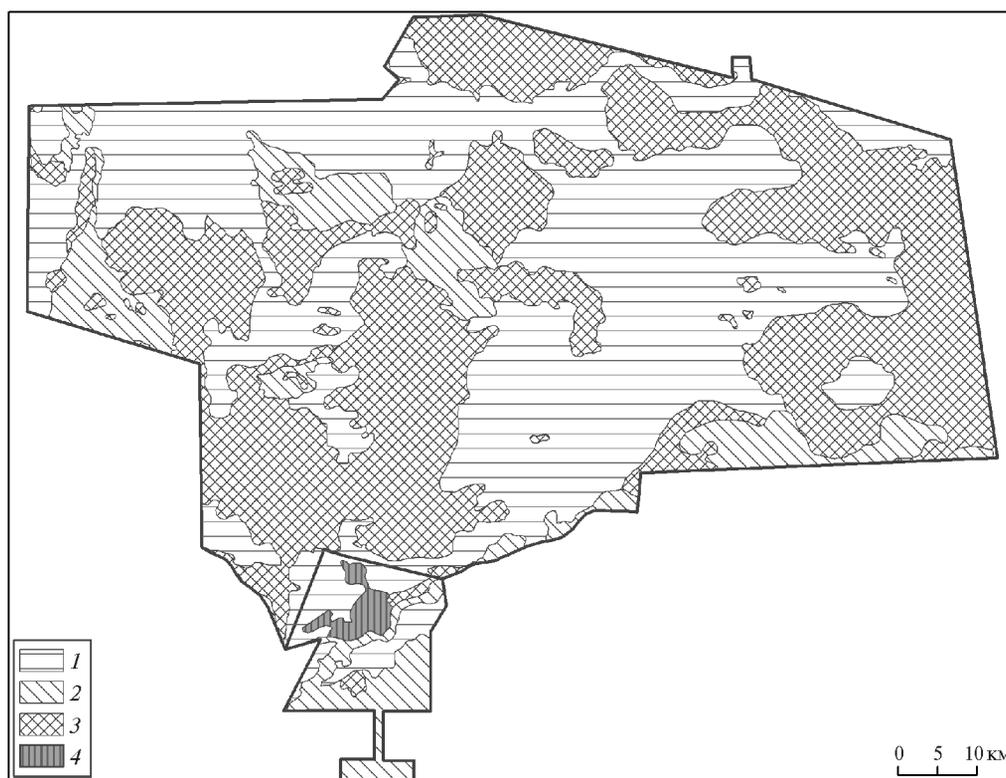


Рис. 3. Устойчивость почв к физическому воздействию: 1 — низкая, 2 — средняя, 3 — высокая; 4 — территория г. Байконур

Таблица 4

Количественные критерии балльных оценок

Показатели		Степень устойчивости		
		1 — низкая	2 — средняя	3 — высокая
Содержание фракции <0,01 мм, %:		<10	10–40	60–90
Плотность, г/см ³	устойчивость к химическому загрязнению	1,4–1,5	1,6–1,8	
	устойчивость к физическому воздействию		1,4–1,5	1,6–1,8
Гумус, %		<0,5	0,5–3	>3
рН				>=8
Влажность, %		<3	6–10	12–22
MnO, мг/кг		<400	500–700	>900
Fe ₂ O ₃ , %		<1,5	2,5–5	>6
Cu, мг/кг		<35	35–55	>55

глинистая, солончак такыровидный, аллювиально-луговая супесчаная и суглинистая, солончак, такыр и такыровидная суглинистая солонцевато-солончаковатая, серо-бурая суглинистая в комплексе с серо-бурой суглинистой солонцеватой и солончаковатой → такыр глинистый.

В целом почвы с низкой устойчивостью к физическому воздействию занимают 46% территории космодрома, почвы со средней устойчивостью — 52%, с высокой устойчивостью лишь 2%.

Выводы:

— оценка устойчивости почв космодрома Байконур к техногенному воздействию выполнена на основе характеристик почвенного покрова, полученных в результате масштабных полевых и химико-аналитических исследований. Для оценки устойчивости почв к химическому загрязнению предложен комплекс показателей, учитывающих как традиционные характеристики физических и химических свойств почв, так и оценку каталити-

ческих свойств почв, впервые использованную авторами. Особенно высока роль каталитических свойств почв при оценке устойчивости почв к загрязнению несимметричным диметилгидразином. Большинство почв космодрома обладают средней и высокой каталитической активностью. Минимальной каталитической активностью из почв, представленных на космодrome Байконур, обладают песчаные пустынные почвы;

— оценка устойчивости почв по всему комплексу показателей показала, что в целом наиболее уязвимы к химическому загрязнению компонентами ракетных топлив серо-бурые суглинистые в комплексе с серо-бурой суглинистой солонцеватой и солончаковатой, а также песчаные пустынные и аллювиально-луговые супесчаные и суглинистые почвы (в сумме они занимают 37% территории космодрома); наиболее устойчивы солончаки, такыры и такыровидные суглинистые солонцевато-солончаковатые почвы (44% территории). На территориях, природные почвы которых обладают низкой устойчивостью к химическому воздействию, размещено примерно 65% производственных объектов космодрома Байконур и лишь 27% — на участках с высокой потенциальной устойчивостью почв к химическому загрязнению;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

Ботаническая география Казахстана и Средней Азии (в пределах пустынной области) // Тр. Ботан. ин-та имени В.Л. Комарова РАН. СПб., 2003. 424 с.

Botanicheskaia geografija Kazahstana i Srednej Azii (v predelah pustynnoj oblasti) [Botanical geography of Kazakhstan and Central Asia (within the desert area)], Tr. Botanich. in-ta imeni V.L. Komarova RAN. St.-Petersburg, 2003, 424 p. (in Russian).

Братков А.А., Серегин Е.П., Горенков А.Ф. и др. Химмотология ракетных и реактивных топлив. М.: Химия, 1987. 304 с.

Bratkov A.A., Seregin E.P., Gorenkov A.F. et al. Himmotologija raketnyh i reaktivnyh topliv [Chemmotology of rocket and jet fuels], Himija, Moscow, 1987, 304 p. (in Russian).

Букс И.И. Некоторые методические подходы к оценке устойчивости природных комплексов для целей прогноза состояния окружающей природной среды // Проблемы фонового мониторинга состояния природной среды. Вып. 5. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 200–212.

Buks I.I. Nekotorye metodicheskie podhody k ocenke ustojchivosti prirodnyh kompleksov dlja celej prognoza sostojanija okruzhajushhej prirodnoj sredy [Some methodological approaches to assessing the sustainability of natural systems for the purposes of predicting the state of the environment], Problemy fonovogo monitoringa sostojanija prirodnoj sredy, V. 5, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, pp. 200–212 (in Russian).

Буряк А.К., Татаурова О.Г., Ульянов А.В. Исследование продуктов трансформации несимметричного диметилгидразина на модельных сорбентах методом газохроматографии/масс-спектрометрии // Масс-спектрометрия. 2004. № 1 (2). С. 147–152.

— механическое разрушение поверхностного слоя в результате антропогенной деятельности приводит к усилению ветровой и водной эрозии. Это подтверждается наличием у большинства автоморфных почв космодрома песчаного наноса мощностью до 5 см. Ведущие факторы, определяющие устойчивость почв к физической деградации, — гранулометрический состав, плотность почв ненарушенного сложения и сезонное увлажнение почв. Наименьшая устойчивость к механическим нарушениям характерна для почв с легким гранулометрическим составом — песчаных пустынных и серобурых песчаных и супесчаных почв (46% площади космодрома), максимальная — для такыров и солончаков (2%). В настоящее время большинство производственных объектов космодрома (85%) расположено на территориях, природные почвы которых обладают средней устойчивостью к физическому воздействию; 15% объектов размещено на участках с почвами, характеризующимися низкой устойчивостью к физическому воздействию. Соблюдение на объектах космодрома экологических требований к определенным видам работ позволит снизить антропогенную трансформацию природных ландшафтов на прилегающих к ним территориях.

Burjak A.K., Tataurova O.G., Ul'janov A.V. Issledovanie produktov transformacii nesimmetrichnogo dimetilgidrazina na model'nyh sorbentah metodom gazohromatografii/mass-spektrometrii [Studying transformation products of unsymmetrical dimethylhydrazine on model sorbents by gas chromatography / mass spectrometry], Mass-spektrometrija, 2004, no 1 (2), pp. 147–152 (in Russian).

Глазовская М.А. Качественные и количественные оценки сенсорности и устойчивости природных систем к техногенным кислотным воздействиям // Почвоведение. 1994. № 1. С. 134–140.

Glazovskaja M.A. Qualitative and quantitative evaluation of sensority and sustainability of natural systems to anthropogenic acid impacts // Eurasian Soil Science, 1994, no 1, pp. 134–140.

Елизарова Г.Л., Матвиенко Л.Г., Пестунова О.П. и др. Каталитическое окисление 1,1-диметилгидразина кислородом воздуха в разбавленных водных растворах // Кинетика и катализ. 1998. Т. 39, № 1. С. 49–55.

Elizarova G.L., Matvienko L.G., Pestunova O.P. et al. Kataliticheskoe okislenie 1,1-dimetilgidrazina kislorodom vozduha v razbavlenykh vodnykh rastvorah [Catalytic oxidation of 1,1-dimethylhydrazine by atmospheric oxygen in dilute aqueous solutions], Kinetika i kataliz, 1998, Vol. 39, no 1, pp. 49–55 (in Russian).

Касимов Н.С., Кондратьев А.Д., Королева Т.В. и др. Экологический мониторинг ракетно-космической деятельности. М.: Рестарт, 2011. 472 с.

Kasimov N.S., Kondrat'ev A.D., Koroleva T.V. et al. Jekologicheskij monitoring raketno-kosmicheskoy dejatel'nosti [Ecological monitoring of Space-Rocket Activities], Restart, Moscow, 2011, 472 p. (in Russian).

Кондратьев А.Д., Кречетов П.П., Королева Т.В., Черницова О.В. Космодром Байконур как объект природопользования. М.: Пеликан, 2008. 176 с.

Kondrat'ev A.D., Krechetov P.P., Koroleva T.V., Chernitsova O.V. Kosmodrom Bajkonur kak ob'ekt prirodopol'zovanija [Cosmodrome Baikonur as the Object of Nature Management], Pelikan, Moscow, 2008, 176 p. (in Russian).

Кречетов П.П. Методические подходы к количественной оценке устойчивости наземных экосистем к воздействию загрязняющих веществ // Естеств. и техн. науки. 2008. № 6. С. 105–108.

Krechetov P.P. Metodicheskie podhody k kolichestvennoj ocenke ustojchivosti nazemnyh jekosistem k vozdeystviyu zagraznjajushhij veshhestv [Methodological approaches to quantify the sustainability of terrestrial ecosystems to the impacts of pollutants], Estestv. i tehn. nauki, 2008, no 6, pp. 105–108 (in Russian).

Кречетов П.П., Касимов Н.С., Королева Т.В., Черницова О.В. Экспериментальное изучение буферности почв к воздействию несимметричного диметилгидразина // Докл. РАН. 2014. Т. 455, № 3. С. 337–341.

Krechetov P.P., Kasimov N.S., Koroleva T.V., Chernitsova O.V. Experimental Investigations of the Soil Buffer Capacity Relative to the Unsymmetrical Dimethylhydrazine-Induced Impact // Doklady AN. Earth Sciences, 2014, Vol. 455, pp. 1. P. 355–359.

Неронов В.В., Черницова О.В., Королева Т.В., Кречетов П.П. Современное состояние растительности космодрома Байконур и оценка ее потенциальной устойчивости к воздействию ракетно-космической деятельности // Аридные экосистемы. 2012. Т. 18, № 3 (52). С. 72–85.

Neronov V.V., Chernitsova O.V., Koroleva T.V., Krechetov P.P. Contemporary state of vegetation of the Baikonur cosmodrome and estimation of its potential stability to the impact of space rocket launches // Arid Ecosystems, 2012, Vol. 18, no 3 (52), pp. 72–85 (in Russian).

Родин И.А., Ананьева И.А., Смоленков А.Д., Шпигун О.А. Определение продуктов окислительной трансформации несимметричного диметилгидразина в почвах методом жидкостной хроматографии // Масс-спектрометрия. 2009. Т. 6, № 4. С. 302–306.

Rodin I.A., Anan'eva I.A., Smolenkov A.D., Shpigun O.A. Opredelenie produktov okislitel'noj transformacii nesimmetrichnogo dimetilgidrazina v pochvah metodom zhiklostnoj hromotografii [Determining products of oxidative transformation of unsymmetrical dimethylhydrazine in soils by liquid chromatography], Mass-spektrometrija, 2009, V. 6, no 4, pp. 302–306 (in Russian).

Родин И.А., Москвин Д.Н., Смоленков А.Д., Шпигун О.А. ВЭЖХ-МС исследование превращений несимметричного диметилгидразина в почвах // Журн. физ. химии. 2008. Т. 82, № 6. С. 1039–1044.

Rodin I.A., Moskvina D.N., Smolenkov A.D., Shpigun O.A. Transformations of Asymmetric Dimethylhydrazine in Soils // Russian Journal of Physical Chemistry, 2008, Vol. 82, no 6, pp. 911–915.

Родин И.А., Смирнов Р.С., Смоленков А.Д. и др. Трансформация несимметричного диметилгидразина в почвах // Почвоведение. 2012. № 4. С. 439–444.

Rodin I.A., Smirnov R.S., Smolenkov A.D. et al. Transformation of Unsymmetrical Dimethylhydrazine in Soils // Eurasian Soil Science, 2012, V. 45, no 4, pp. 386–391 (in Russian).

Смирнов Р.С., Родин И.А., Смоленков А.Д., Шпигун О.А. Хромато-масс-спектрометрическое определение продуктов трансформации несимметричного диметилгидразина в почвах // Журн. аналит. химии. 2010. Т. 65, № 12. С. 1295–1301.

Smirnov R. S., Rodin I. A., Smolenkov A. D., Shpigun O.A. Determination of the Products of the Transformation of Unsymmetrical Dimethylhydrazine in Soils Using Chromatography/Mass Spectrometry // Journal of Analytical Chemistry, 2010, Vol. 65, no 12, pp. 1266–1272 (in Russian).

Смоленков А.Д., Попутникова Т.О., Смирнов Р.С. и др. Сравнительная оценка токсичности несимметричного диметилгидразина и продуктов его трансформации методами биотестирования // Теория и прикладная экология. 2013. № 2. С. 85–90.

Smolenkov A.D., Poputnikova T.O., Smirnov R.S. et al. Sravnitel'naja ocenka toksichnosti nesimmetrichnogo dimetilgidrazina i produktov ego transformacii metodami biotestirovanija [Comparative evaluation of the toxicity of unsymmetrical dimethylhydrazine and products of its transformation by bioassay], Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija, 2013, no 2, pp. 85–90 (in Russian).

Снакин В.В., Алябина И.О., Кречетов П.П. Экологическая оценка устойчивости почв к антропогенному воздействию // Изв. РАН. Сер. геогр. 1995. № 5. С. 50–57.

Snakin V.V., Aljabina I.O., Krechetov P.P. Jekologicheskaja ocenka ustojchivosti pochv k antropogennomu vozdeystviyu [Environmental assessment of soil sustainability to anthropogenic influence], Izv. RAN. Ser. geogr., 1995, no 5, pp. 50–57 (in Russian).

Ушакова В.Г., Шпигун О.Н., Старыгин О.И. Особенности химических превращений НДМГ и его поведение в объектах окружающей среды // Ползуновский вестн. 2004. № 4. С. 177–184.

Ushakova V.G., Shpigun O.N., Starygin O.I. Osobennosti himicheskij prevrashhenij NDMG i ego povedenie v ob'ektah okružhajushhej sredy [Features of chemical transformations of UDMH and its behavior in the environment], Polzunovskij vestnik, 2004, no 4, pp. 177–184 (in Russian).

Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду: Справочное пособие / Под общ. ред. В.В. Адушкина и др. М.: Анкил, 2000. 640 с.

Jekologicheskie problemy i riski vozdeystvij raketno-kosmicheskoi tehniky na okružhajushhiju prirodnuju sredu [Environmental challenges and risks of the impact of space-rocket technology on the environment: Reference Guide], 2000, Moscow, AnkiL, 640 p. (in Russian).

Кенессов В., Батырбекова С., Наурызбайев М. et al. GC-MS Determination of 1-Methyl-1H-1,2,4-triazole in Soils Affected by Rocket Fuel Spills in Central Kazakhstan // Chromatographia. 2008. Vol. 67. P. 421–424.

P.P. Krechetov, T.V. Koroleva, O.V. Chernitsova

**SOIL COVER OF THE BAIKONUR COSMODROME AREA
AND ITS RESISTANCE TO THE TECHNOGENIC IMPACT**

Soil cover of the Baikonur Cosmodrome area is studied. Basing on the field and chemical-analytical investigations, as well as the Earth remote sensing data the medium-scale (1:300 000) soil map of the cosmodrome area was updated. Soil resistance to chemical and physical impacts related to the rocket-and-space activities was evaluated which allowed zoning the Baikonur Cosmodrome area regarding the potential resistance of soils.

The integral assessment of potential resistance of soils to chemical pollution depends both on the realization of buffer mechanisms of their physical-chemical properties and the catalytic reactivity of the chemical elements. Soils with low potential resistance to chemical impact host about 65% of the cosmodrome operation facilities. These data should be taken into account while planning measures for the environmental risks mitigation and choosing soil decontamination techniques in emergencies.

Factors influencing the resistance of soils to physical impacts were also analyzed. The cosmodrome facilities are located within areas with medium (85%) and low (15%) soil resistance to physical impacts. If the environmental standards for particular types of activities are met at the cosmodrome facilities the anthropogenic transformation of natural landscapes in their vicinity could be scaled down.

Key words: resistance, soils, components of rocket fuel, dimazine, the Baikonur Cosmodrome, ecosystem, chemical resistance, physical resistance.