

Уточнение занимаемых пустынями и степями территорий при спутниковом картографировании наземных экосистем России

С. С. Шинкаренко¹, С. А. Баргалева¹, И. А. Сайгин¹, И. Э. Смелянский²

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru*

² *ООО «Лаборатория «Экотон», Самара, 443052, Россия*

Степные и пустынные экосистемы России обладают высокой природоохранной ценностью как местообитания редких видов животных и растений, а также значительным климаторегулирующим потенциалом, что позволяет отнести задачу их картографирования и мониторинга к числу приоритетных. Однако большинство имеющихся спутниковых карт растительного покрова глобального и национального охвата либо не отделяют степные экосистемы от другой травянистой растительности, либо их выделение основано на использовании недостаточно репрезентативной опорной информации. Проведённое исследование направлено на уточнение картографирования степной (в том числе в полупустыне) и пустынной растительности использованием разновременных спутниковых данных среднего пространственного разрешения с устранённым влиянием облачности, а также репрезентативной опорной выборки данных по результатам экспертного дешифрирования высокодетальных спутниковых изображений и выборочной наземной верификации. В результате по данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) получена серия ежегодных карт земного покрова России за 2001–2023 гг. с уточнённым выделением территорий, занимаемых степными и пустынными экосистемами. По данным спутникового картографирования в стране ежегодно детектируется 41–42 млн га степных и пустынных экосистем. Сопоставление полученных результатов с площадью пастбищ на уровне муниципальных районов показало высокий уровень их согласованности в пустынных и степных биомах, где идентифицировано 95 % площади пастбищ. В неморальных биомах отличия в площади выявленных степных экосистем от площади пастбищ более выражены. Это может быть связано с неопределённостью из-за отнесения к пастбищам лугов, а мезофитных вариантов степей к сенокосам при землеустройстве, а также с перепутыванием луговых степей и остепнённых лугов по данным дистанционного зондирования. Также в неморальных биомах средняя площадь отдельных степных контуров минимальна, из-за чего высока доля граничных пикселей. Полученные карты открывают перспективы определения актуального состояния зональной растительности степной и пустынной зон, а также анализа основных факторов его динамики.

Ключевые слова: степи, пустыни, биомы, земной покров, спутниковый мониторинг, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 13.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-218-235

Введение

Степные (включая полупустыню) и пустынные экосистемы играют важнейшую роль в сохранении биоразнообразия и регулировании климата. По некоторым оценкам чистая первичная продукция степей в России достигает 290 млн т углерода в год, а сток углерода в степных и пустынных экосистемах составляет 111 млн т (Голубятников и др., 2023; Оценка..., 2023). Большая часть степей в России была распахана, значительная часть пашни в менее благоприятных для земледелия условиях была заброшена и находится на разных стадиях залежных сукцессий (Чибилёв, 2017; Prishchepov et al., 2021). Нераспаханные участки степной растительности и преобладающая доля пустынь используются либо в качестве пастбищ, либо не охвачены хозяйственной деятельностью. Интенсивный выпас домашнего скота без учёта пастбищной ёмкости ландшафтов может приводить к деградации степных и пустынных экосистем вплоть до полной утраты растительного покрова (Шинкаренко и др., 2024). Отсутствие выпаса способствует накоплению растительной ветоши и подстилки, из-за

чего существенно возрастает риск возникновения степных пожаров (Шинкаренко и др., 2022; Pavleychik et al., 2022). Своевременное обнаружение процессов деградации степных и пустынных экосистем возможно на основе как наземных исследований, так и с использованием данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий (Трофимов и др., 2015). Инвентаризация степных массивов России и систематический мониторинг их состояния указываются в числе приоритетных задач для сохранения степей страны (Смелянский и др., 2006). Карты наземных экосистем, в том числе степных и пустынных, позволяют проводить количественную оценку сезонной и многолетней динамики их состояния, анализировать изменения в землепользовании и решать задачи по их сохранению (Slavko et al., 2023). При этом в исследованиях динамики состояния травяных экосистем зачастую степная, пустынная и интразональная луговая растительность не разделяется, что может приводить к неопределённости как при анализе направления изменений её состояния, так и при оценке вклада различных факторов (Li et al., 2013). По этим причинам особую важность имеют карты растительного покрова, на которых отражается отдельно зональная пустынная, степная и интразональная луговая растительность. На разработанных в Институте космических исследований РАН картах типов земного покрова представлены классы степной и луговой растительности (Барталев и др., 2016), но выборочная экспертная проверка выявила существенный недоучёт площади степных экосистем в подзоне типичной степи и лесостепной зоне из-за отнесения их к лугам.

Большинство существующих глобальных карт типов земного покрова, полученных на основе данных дистанционного зондирования Земли, не разделяет зональную степную, пустынную растительность и интразональные луга (Tishkov et al., 2020), ограничиваясь одной категорией травяных экосистем (*англ.* grasslands). Геоботанические карты редко учитывают хозяйственное использование территории, например распашку (Сафронова, 2002; Safronova et al., 2023), либо создаются на ограниченную территорию, поскольку опираются преимущественно на материалы наземных исследований (Намзалов, 1996; Огуреева и др., 2009). Картографирование степей на основе экспертного дешифрирования высокодетальных спутниковых изображений позволяет обеспечить достаточно высокую точность, но из-за трудоёмкости редко охватывает большие площади (Блакберн, 2018) либо требует существенных временных и финансовых затрат (Рогова, Скворцов, 2016). Также степные и пустынные ландшафты характеризуются высокой динамичностью состояния и структуры, которые связаны со значительной многолетней и внутригодовой изменчивостью ботанического состава, аспектов, фитомассы (Трофимов и др., 2015; Li et al., 2013), с распашкой, природными пожарами, пастбищными нагрузками, восстановительными и деградационными процессами (Павлейчик и др., 2024; Тишков, 2024; Шинкаренко и др., 2021; Prishchepov et al., 2021; Shinkarenko et al., 2023), зарастанием древесно-кустарниковой растительностью (Терехин, 2018, 2022), из-за чего требуется регулярное обновление карт степных и пустынных экосистем (Шинкаренко и др., 2024).

Согласно сведениям из Национального атласа почв Российской Федерации (Национальный..., 2011; далее «Атлас почв РФ») в почвенно-географической базе данных России (<https://soil-db.ru/>) в стране на 2006 г. зарегистрировано 67,9 млн га пастбищ, 23,7 млн га сенокосов, 5,3 млн га залежей и 4,5 млн га песков. Таким образом, по этим данным площадь травяных экосистем за пределами лесных земель в стране может достигать около 80–90 млн га. Согласно данным Росреестра в период 2012–2023 гг. в стране площади пастбищных и сенокосных угодий практически не менялись, оставаясь на уровне 56,9–57,3 и 18,6–18,7 млн га соответственно. Площадь пастбищных угодий в регионах степной и пустынной зон по данным Росреестра составляет около 50 млн га, ряд исследователей предлагал использовать эту величину как оценочную для площади зональных степей и пустынь страны (Smelansky, Tishkov, 2012). По данным сельскохозяйственной переписи в России в 2006 г. было 35,2 млн га используемых пастбищ (Итоги..., 2008) и 26,5 млн га — в 2016 г. (Итоги..., 2018). А. А. Тишков с соавторами (Tishkov et al., 2020) приводят сведения о 68 млн га пастбищ и 24 млн га сенокосов, в том числе 34 млн га, находящихся в степной зоне. В степной и пустынной зонах в качестве пастбищ, как правило, используются

зональные экосистемы, а более продуктивные луга и мезофитные варианты степей чаще служат сенокосами (Vasilchenko, 2023). На картах типов земного покрова, разрабатываемых в ИКИ РАН (Барталев и др., 2016), ежегодно представлено в среднем около 30 млн га степной и пустынной растительности. На карте сохранившихся степных экосистем (степных массивов) России, созданной в рамках проекта «Совершенствование системы и механизмов управления ООПТ в степном биоме России» (<http://savesteppe.org/ru/maps>, далее «Степной проект») в 2011–2016 гг., зафиксировано 22,2 млн га участков степной и пустынной растительности площадью более 100 га в европейской части и более 500 га — в азиатской (Рогова, Скворцов, 2016). Данная оценка не учитывает около 1 млн га пустынной растительности в левобережных районах Астраханской области. По оценке Л. Л. Голубятникова с соавторами (2023), которая основывается на данных Степного проекта и анализе статистических материалов о выбывших из сельскохозяйственного оборота землях, в стране 47,8 млн га природных и вторичных степных и пустынных экосистем. По данным И. С. Зонна с соавторами (2004) на аридных территориях России, к которым авторы относят лесостепную, степную и пустынную зоны, на начало 2001 г. было 49,4 млн га пастбищ, в том числе 31,5 млн га степных и пустынных. В то же время статистическая информация о площадях пастбищ не даёт достаточно детальных сведений об их пространственном распределении для анализа состояния степной и пустынной растительности. Таким образом, диапазон оценок площади степных и пустынных экосистем в России достаточно широк и составляет примерно 20–80 млн га, поэтому крайне актуальным представляется совершенствование карт растительного покрова в части отображения зональной растительности аридной зоны страны.

Цель исследования заключается в разработке карт степной и пустынной растительности России на основе применяемых в ИКИ РАН методов обработки спутниковых данных и коррекции обучающей выборки для их классификации.

Материалы и методы исследования

Разработка карт степной и пустынной растительности основывается на использовании разновременных данных MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) пространственного разрешения 230 м с устранённым влиянием облачности (Миклашевич и др., 2019), зимних композитных изображений (Барталев и др., 2022) и метода локально-адаптивной классификации земного покрова LAGMA (*англ.* Locally Adaptive Global Mapping Algorithm) (Bartalev et al., 2014). Этот подход применяется для построения ежегодных карт растительного покрова России, разрабатываемых ИКИ РАН. Опорная выборка для классификации растительного покрова при этом включала примерно 15 млн га степных и пустынных экосистем (*табл. 1, рис. 1*, см. с. 222), практически не охватывая зону лесостепи и северную подзону степной зоны, где зональными вариантами являются луговые и типичные степи соответственно. Для коррекции выборки использовалась карта сохранившихся степных массивов Степного проекта, полученная на основе экспертного дешифрирования спутниковых изображений высокого, сверхвысокого пространственного разрешения и полевой верификации в 2011–2015 гг. (Рогова, Скворцов, 2016). Выделенные в рамках Степного проекта контуры степных массивов включают не только зональные экосистемы, но и древесно-кустарниковую растительность (ДКР), солончаки, луга, пашни. Пикселям выборки, которые относились к луговой растительности на картах ИКИ РАН и попали в границы степных массивов карты Степного проекта, был присвоен класс степей. Также из опорных данных были исключены степи и луга, которые за период 2001–2023 гг. подвергались распашке хотя бы раз. Карты пахотных земель ИКИ РАН характеризуются достаточно высокой точностью, например, проведённое в Волгоградской области исследование показало различие всего в 4 % в площадях пашни по результатам экспертного дешифрирования разновременных спутниковых изображений высокого и сверхвысокого разрешения с данными ИКИ РАН (Синельникова и др., 2023). Таким образом была получена скорректированная обучающая выборка (см. *табл. 1, рис. 1*). Пиксели, которые не входили в обучающую выборку, но были отнесены к степной и пустынной растительности на картах Степного проекта, использовались как контрольная

выборка для оценки точности классификации. К степной и пустынной растительности относится комплекс зональных сообществ соответствующих природных зон, а также кустарничковые, горные, псаммофитные, галофитные и петрофитные варианты.

Таблица 1. Площадь (в млн га) опорных выборок данных для картографирования степей

	Предыдущая версия	Степной проект	Новая версия	Контрольная выборка
<i>Зонобиомы</i>				
Пустынные	7,29	8,84	7,24	3,5
Степные	5,30	7,47	6,53	3,7
Неморальные широколиственнолесные и лесостепные	0,03	0,94	0,63	0,3
Всего	12,62	17,26	14,40	7,5
<i>Оробиомы</i>				
Бореальные (таёжные)	2,38	3,62	2,34	2,3
Степные	0,16	1,13	0,16	1,1
Неморальные хвойно-широколиственные и широколиственнолесные	0,01	0,20	0,15	0,1
Всего	2,55	4,95	2,66	3,5
<i>Вся территория</i>				
Итого:	15,17	22,20	17,05	11,0

В качестве контрольных данных также выступили статистические данные Росреестра о землепользовании на 2006 г. на уровне муниципальных районов, представленные в почвенно-географической базе данных России (Атлас почв РФ). Каждому району был присвоен биом, для граничных районов выбирался биом с наибольшей площадью. Предполагается, что пастбищные земли в степной и пустынной зонах представлены соответствующими типами зональной растительности (Smelansky, Tishkov, 2012). При этом возможна неопределённость, связанная с отнесением к пастбищам луговых вариантов степей и интразональных лугов, особенно в зоне лесостепи и горных районах, из-за чего по статистическим данным площадь пастбищ может быть больше площади зональных степных и пустынных сообществ. В то же время некоторая часть степной и пустынной растительности расположена на разновозрастных залежах, песках, а также землях, имеющих не сельскохозяйственное назначение, что также снижает точность оценки площадей степей и пустынь по данным землеустройства. По этим причинам кроме пастбищ к степной и пустынной растительности по данным статистики были добавлены площади залежей и песков, которые часто используются для выпаса. Сельскохозяйственные переписи включают сведения о фактически используемых сельскохозяйственных угодьях, поэтому площади степей, согласно подобным данным, существенно меньше площадей степной и пустынной растительности.

Разделение степной растительности на пустынную и собственно степную на данном этапе нецелесообразно из-за значительного сходства растительности подзон опустыненных степей (полупустыни) и северных пустынь, вызванного пастбищными нагрузками и восстановительными сукцессиями на залежах, наличием засоленных и щебнистых почв (Safronova et al., 2020). По этим причинам растительность опустыненных степей зачастую трудно отличима от пустынной, так как в этих условиях происходит замещение дерновинно-злаковой растительности полукустарничками, однолетниками и эфемероидами, а в интразональных галофитных и петрофитных вариантах степей могут доминировать полукустарнички и другая характерная для северных пустынь растительность (Сафронова, 2002; Zolotareva, Podgaevskaya, 2012). На карте сохранившихся степных массивов Степного проекта подзоны опустыненных степей и северных пустынь также объединены в одну категорию.

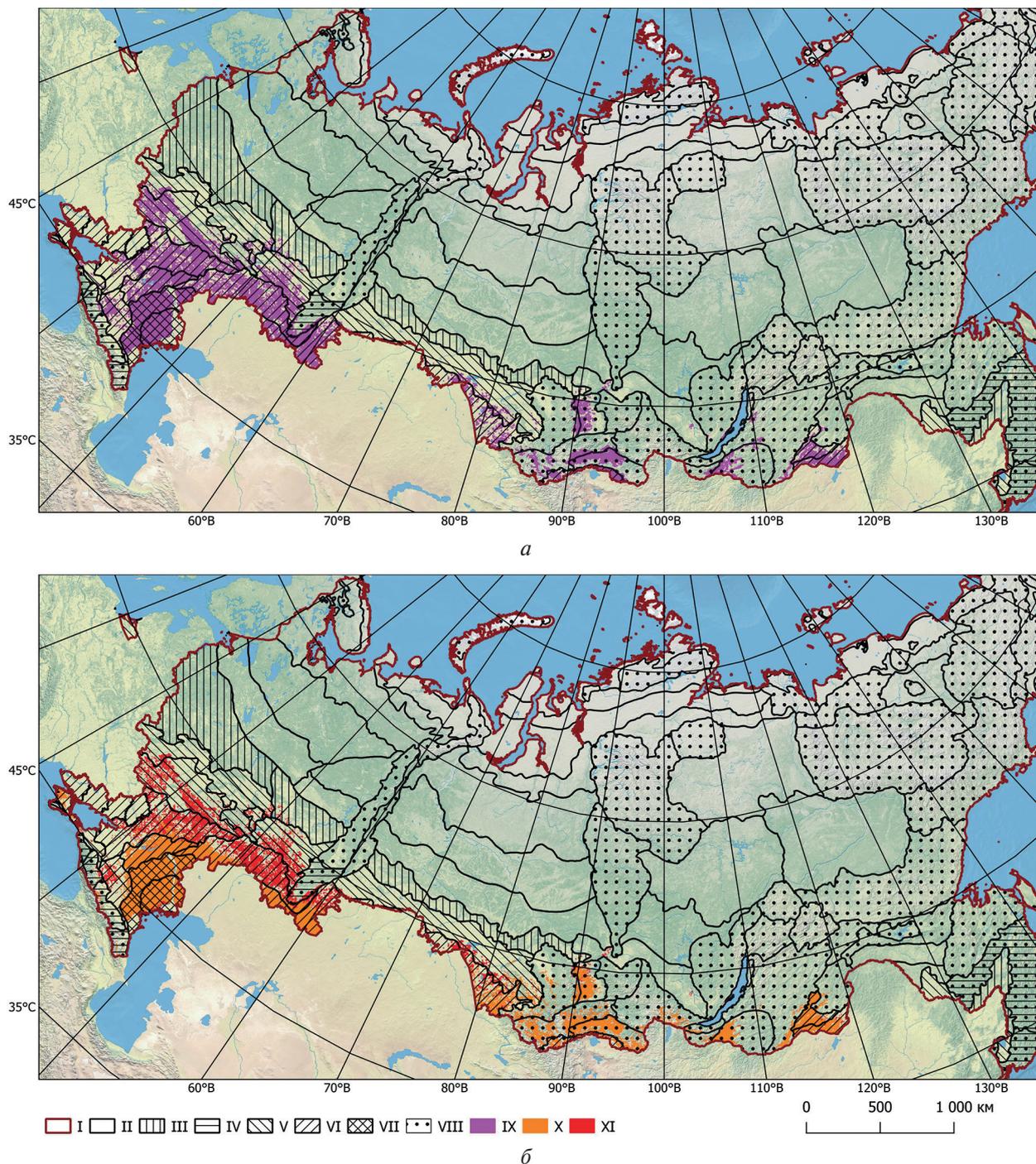


Рис. 1. Опорные выборки для картографирования пустынной и степной растительности: а — Степной проект; б — выборка для карт ИКИ РАН (I — границы РФ, биомы: II — бореальные (таёжные), III — подтаёжные, IV — неморальные хвойно-широколиственные и широколиственнолесные, V — неморальные широколиственнолесные и лесостепные, VI — степные, VII — пустынные, VIII — оробиомы, IX — данные Степного проекта, X — первоначальная версия выборки, XI — дополнения к выборке в новой версии)

Обработка спутниковых данных производилась с применением сервиса «Vegetation Science» (Lourian et al., 2022) и инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015). В качестве базовой карты использовались данные проекта Natural Earth (<https://www.naturalearthdata.com/>). Границы биомов приводятся согласно карте «Биомы России» 1:7 500 000 (2015), в которой выделено 35 равнинных зонобиомов и 31 горный оробиом (Биоразнообразие..., 2020; Огуреева, Бочарников, 2017).

Результаты и обсуждение

В результате применения обновлённой обучающей выборки для картографирования растительного покрова получена серия карт за период 2001–2023 гг. (рис. 2), которые отражают в среднем около 70 % степной и пустынной растительности контрольной выборки (табл. 2) против 55 % в предыдущей версии (рис. 3, см. с.224).

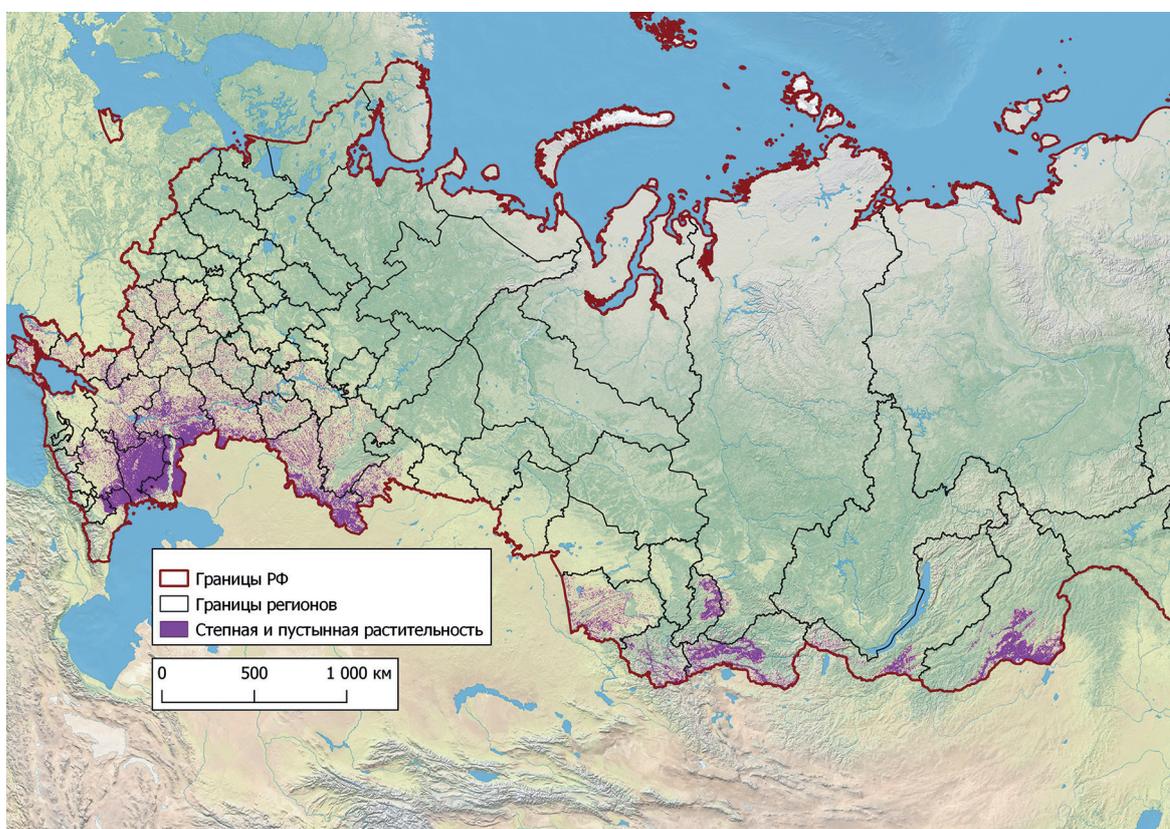


Рис. 2. Карта распространения степной и пустынной растительности в 2023 г.

Таблица 2. Распределение площади (в %) контрольной выборки по данным Степного проекта по типам земного покрова обновлённых карт ИКИ РАН за 2001–2023 гг.

	Типы земного покрова					
	Степи	ДКР	Луга	Пашни	Открытые грунты и выходы горных пород	Прочее
<i>Зонабиомы</i>						
Пустынные	89,5	0,0	6,9	1,6	1,7	0,4
Степные	66,5	3,6	16,9	10,3	1,6	1,1
Неморальные	14,8	2,5	17,8	62,7	0,9	1,4
Всего	74,9	1,9	12,2	8,6	1,6	0,8
<i>Оробиомы</i>						
Бореальные (таёжные)	51,2	22,9	7,2	1,8	14,2	2,8
Степные	31,0	1,1	0,0	1,9	65,2	0,7
Неморальные	63,6	2,6	19,4	13,0	0,5	0,9
Всего	45,2	15,9	5,2	2,0	29,7	2,1
<i>Вся территория</i>						
Итого:	69,4	4,5	10,9	7,4	6,8	1,0



Рис. 3. Пример картографирования степной растительности: *а* — спутниковое изображение Sentinel-2 от 20 августа 2023 г., Волгоградская область, типичные степи (стрелка — направление аэросъёмки); *б* — аэрофотография (июль 2021 г.); *в* — предыдущая версия карты степей; *г* — новая карта степей (I — степные массивы по данным Степного проекта, II — результат картографирования степей)

В степных и пустынных биомах совпадение с контрольной выборкой составило 78 %. Наиболее точно степная и пустынная растительность детектируется в пустынных биомах, где доля площади природных пастбищ максимальна. В то же время здесь распространены значительные площади солончаков, а приуроченная к ним галофитная растительность зачастую относится к лугам (Шинкаренко, Барталев, 2023). Неморальные лесостепные биомы, наоборот, характеризуются наибольшей фрагментарностью и небольшими размерами участков со степной растительностью (Tishkov et al., 2020), из-за чего большая их часть перепутывается с лугами и пахотными землями (рис. 4, см. с. 225). Анализ количества и среднего размера контуров степной растительности это подтверждает: в неморальных биомах средняя площадь участка степей не превышает 40 га (табл. 3).

По данным карт типов земного покрова Европейского космического агентства (англ. European Space Agency) пространственного разрешения 300 м (Bontemps et al., 2015) в лесостепной и степной зонах почти 17 млн га представлены разными сочетаниями площади травянистой растительности, пашни и ДКР. Соответственно, эти смешанные или граничные пиксели в разные годы могут быть отнесены к одной из категорий в зависимости от состояния травянистой луговой, степной растительности и посевов на сельскохозяйственных полях. Отчасти эта проблема может быть в дальнейшем решена за счёт использования спутниковых данных более высокого пространственного разрешения. Также для лесостепи характерны луговые степи, которые схожи с остепнёнными лугами и обладают аналогичными спектрально-отражательными характеристиками. Поэтому в перспективе целесообразно введение объединённого класса луговых степей и остепнённых лугов в неморальных биомах.

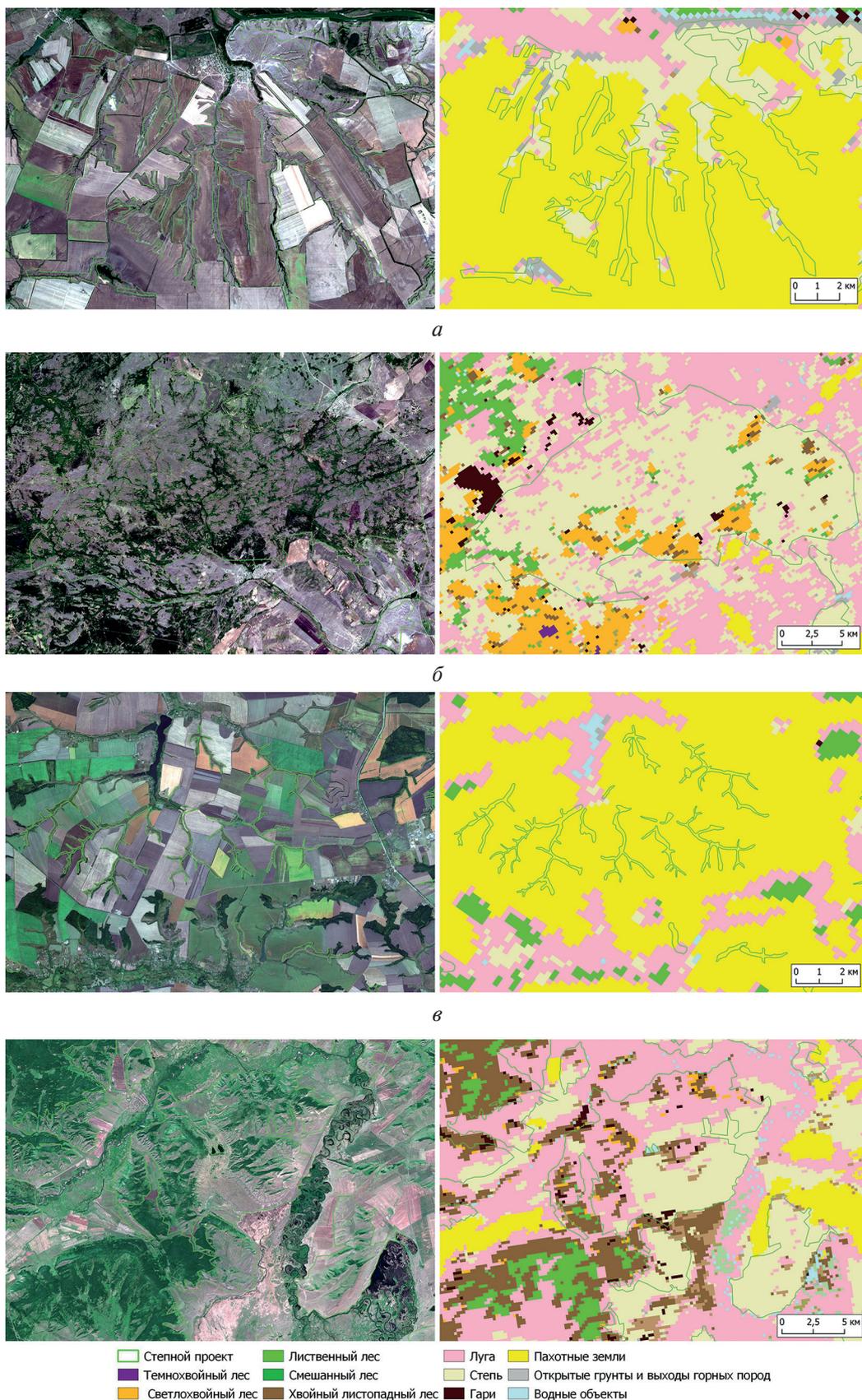


Рис. 4. Примеры несовпадения результатов картографирования степей и контрольной выборки по данным Степного проекта: а — степной зонобиом, Волгоградская область; б — степной зонобиом, Челябинская область; в — неморальный зонобиом, Курская область; г — таёжный оробиом, Республика Хакасия

Таблица 3. Площадь степной и пустынной растительности в биомах России в 2023 г. (в границах на февраль 2022 г.)

	Все степи и пустыни			Контурные площади от 15,9 га		
	Площадь, млн га	Количество, тыс. шт.	Средняя площадь, га	Площадь, млн га	Количество, тыс. шт.	Средняя площадь, га
<i>Зонобиомы</i>						
Пустынные	12,2	6,0	2049,6	12,2	2,3	5412,7
Степные	17,8	99,7	178,9	17,5	42,3	413,2
Неморальные	3,8	98,9	38,8	3,5	41,5	83,3
Всего	33,9	204,6	165,6	33,1	86,0	385,0
<i>Оробиомы</i>						
Бореальные (таёжные)	6,4	48,3	131,8	6,2	16,6	369,8
Степные	0,9	3,7	242,5	0,9	1,4	631,8
Неморальные	0,5	9,9	53,8	0,5	3,8	131,6
Всего	7,8	61,9	125,9	7,5	21,8	345,4
<i>Вся территория</i>						
Итого:	41,9	272,1	153,9	40,8	110,0	370,9

Значительная часть горных степей была отнесена к открытым грунтам и выходам горных пород, что связано с низкими сомкнутостью и фитомассой растительности горных склонов (Королюк, Макунина, 2009). Множество контуров контрольной выборки по данным Степного проекта включает луга, открытые грунты и выходы горных пород, массивы древесно-кустарниковой растительности и пахотные земли, поэтому их нельзя считать абсолютно достоверными с точки зрения отображения степной и пустынной растительности (см. рис. 4). Одной из проблем для картографирования степей также является их зарастание ДКР на склонах овражно-балочной сети не только в лесостепи (Терехин, 2018), но и в степной зоне (см. рис. 3б). Из-за наличия ДКР степные склоны зачастую детектируются по спутниковым данным как луга. По этим причинам реальная площадь правильно выявленных участков степной и пустынной растительности выше, чем 69,4 %, но оценить её более точно не представляется возможным, так как отсутствуют более достоверные карты.

В среднем ежегодно в России детектируется около 41,7 млн га степной и пустынной растительности в границах февраля 2022 г., из которых 30 млн га расположены в зонах степей и пустынь (табл. 3). По предыдущей версии карт типов земного покрова площадь степей была равна 31–32 млн га. На 2023 г. в стране зафиксировано 110 тыс. степных массивов площадью в три и более пикселей MODIS (15,9 га и более), средняя площадь которых составила 371 га. Всего выделено более 260 тыс. контуров степной и пустынной растительности средней площадью 153,9 га. Согласно Атласу почв РФ в районах со степной и пустынной растительностью расположено 54,3 млн га пастбищ (рис. 5, см. с. 227, табл. 4). Полученная разница в оценках может быть обусловлена как луговой растительностью в категории пастбищ, так и перепутыванием луговых степей и остепнённых лугов по данным дистанционного зондирования.

Полученные площади степной и пустынной растительности достаточно точно согласуются со статистическими данными на уровне муниципальных районов в степных и пустынных равнинных биомах (табл. 4, рис. 6, см. с. 229). При этом в пустынной зоне этот тип растительности достаточно точно выделялся и на предыдущей версии карты типов земного покрова: коэффициент детерминации R^2 равен 0,97, среднеквадратическая ошибка (СКО) — 45,5 тыс. га (16 % от средней площади степной и пустынной растительности в районе). Наиболее существенное увеличение точности карты степной растительности достигнуто в степных равнинных биомах, где идентифицировано 90 % площади пастбищ, значение R^2 увеличилось с 0,77 до 0,9, а СКО снизилась с 44,3 до 29,4 тыс. га (86 и 57 % соответственно).

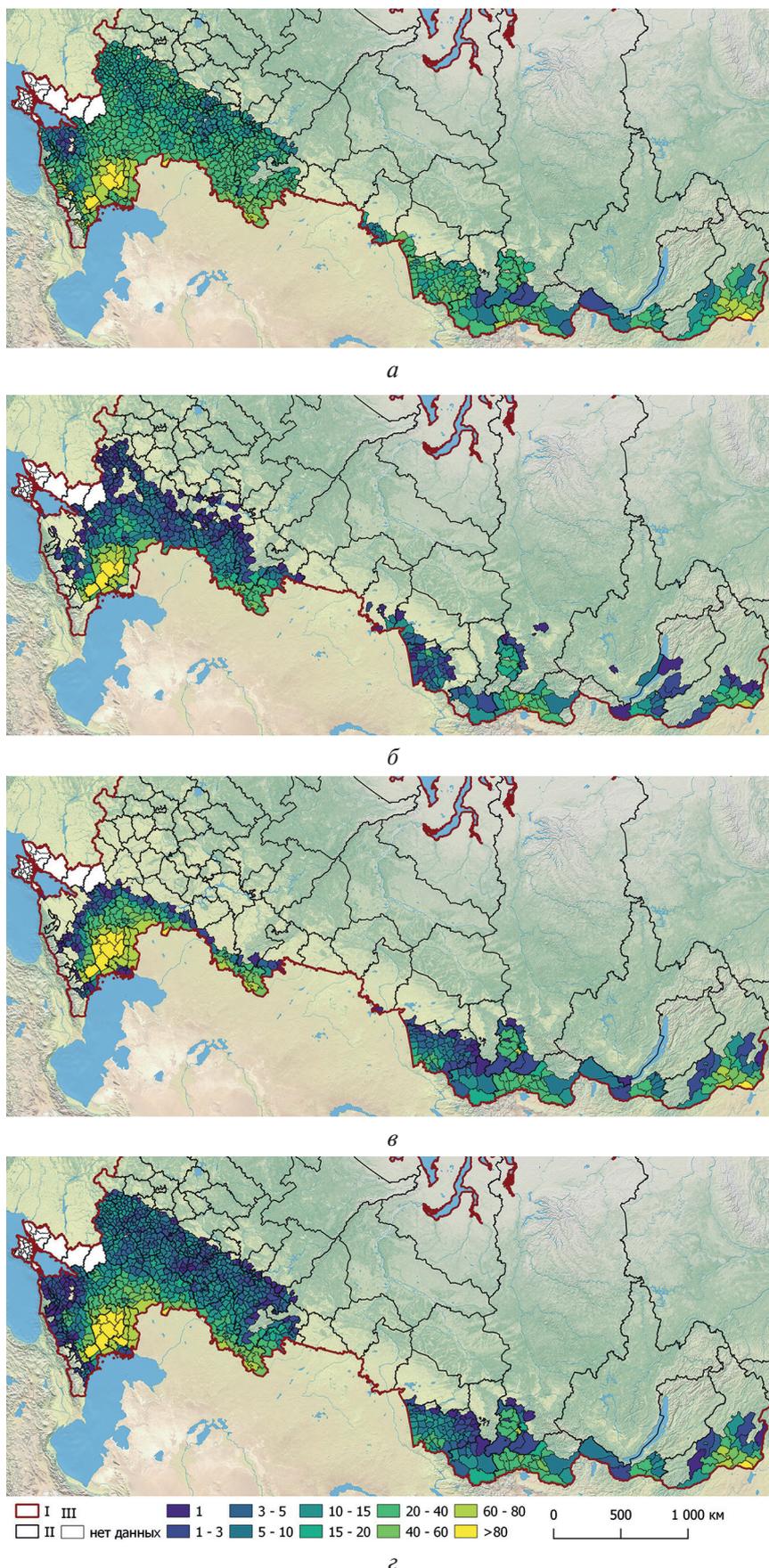


Рис. 5. Доля площади (в %) пастбищ в 2006 г.: а — по Атласу почв РФ; б — степных и пустынных экосистем в районах по данным Степного проекта; в — по предыдущей версии карты ИКИ РАН; г — в новой версии карты ИКИ РАН (I — граница РФ, II — границы регионов, III — доля площади степей)

Таблица 4. Сравнение площади пастбищ по данным почвенно-географической базы данных РФ (Атлас почв РФ) и результатам картографирования степной и пустынной растительности в биомах России в 2006 г.

	Площадь (Атлас почв РФ), млн га	Новая версия			Предыдущая версия		
		Площадь, млн га	Разница, %	СКО, тыс. га	Площадь, млн га	Разница, %	СКО, тыс. га
<i>Зонабиомы</i>							
Пустынные	12,0	12,4	3,4	45,5	12,3	2,1	44,5
Степные	18,5	16,7	–10,0	29,4	11,7	–36,8	44,3
Неморальные	10,1	3,9	–61,7	18,9	0,2	–97,9	23,8
Всего	40,7	33,0	–18,9	26,7	24,2	–40,6	35,7
<i>Оробиомы</i>							
Бореальные (таёжные)	9,4	6,7	–28,4	39,1	6,4	–83,7	70,1
Степные	1,4	0,9	–37,8	166,8	0,8	–99,5	182,9
Неморальные	2,9	0,5	–82,4	25,8	0,0	–99,8	29,9
Всего	13,6	8,1	–40,7	52,0	7,2	–86,2	17,0
<i>Вся территория</i>							
Итого	54,3	41,3	–24,0	44,7	31,4	–29,8	49,1

Отмечается некоторое превышение площади степей по результатам картографирования по сравнению с площадью пастбищ, это может быть связано с их отнесением к другим категориям, например, землям запаса, обороны и безопасности, а также учётом по статистике залежей как используемой пашни. В неморальных равнинных биомах площадь выявленных степей остаётся существенно меньше площади пастбищ согласно Атласу почв РФ. Причиной неопределённости может быть как перепутывание луговых степей и лугов по данным дистанционного зондирования, так и отнесение к пастбищам луговой растительности, а мезофитных вариантов степей к сенокосам по статистической информации. В целом по равнинным биомам удалось детектировать 81 % площади пастбищ.

В горных биомах общая доля выявленных пастбищ соответствует равнинным — 82 %, при этом для таёжных оробиомов характерны большие площади степей в сравнении со статистическими данными, а в степных и неморальных — меньшие. Для степного оробиома присущи значительные площади низкопродуктивных горных вариантов степей с разреженным травостоем. Основная часть таких степей по данным дистанционного зондирования относится к открытым грунтам и выходам горных пород, поскольку проективное покрытие растительности в течение всего периода вегетации не превышает 40–60 % (Королюк, Макунина, 2009). Значения СКО определения площадей в районах оробиомов довольно велики: в степных СКО = 167 тыс. га (77,4 %), а в таёжных — 39,1 тыс. га (76 %).

Наибольшие значения ошибок характерны для неморальных зоно- и оробиомов, поскольку степи в них наиболее фрагментированы, а отдельные участки степной растительности имеют самую маленькую площадь. Более половины всех выявленных в неморальных биомах массивов степной растительности имеет площадь менее трёх пикселей MODIS (табл. 3), а средняя площадь степей в муниципальных районах неморального зонобиома составляет 8,2 тыс. га, а оробиома — 5,1 тыс. га, в то время как средняя площадь пастбищ по данным землеустройства в обоих случаях около 23 тыс. га. Как было отмечено выше, это может быть связано как с перепутыванием лугов и луговых степей при картографировании, так и отнесением к пастбищам не только степной, но и луговой растительности. Расширение легенды карт травянистой растительности в перспективе способно помочь в решении этой проблемы, поскольку луговые степи и остепнённые луга, характерные для неморальных биомов, могут быть выделены в отдельный класс. В степных и пустынных зонобиомах, где соответствующие типы растительности являются зональными, удалось идентифицировать 95 % пастбищ с $R^2 = 0,95$ и СКО = 32 тыс. га (40,5 %) на уровне муниципальных районов.

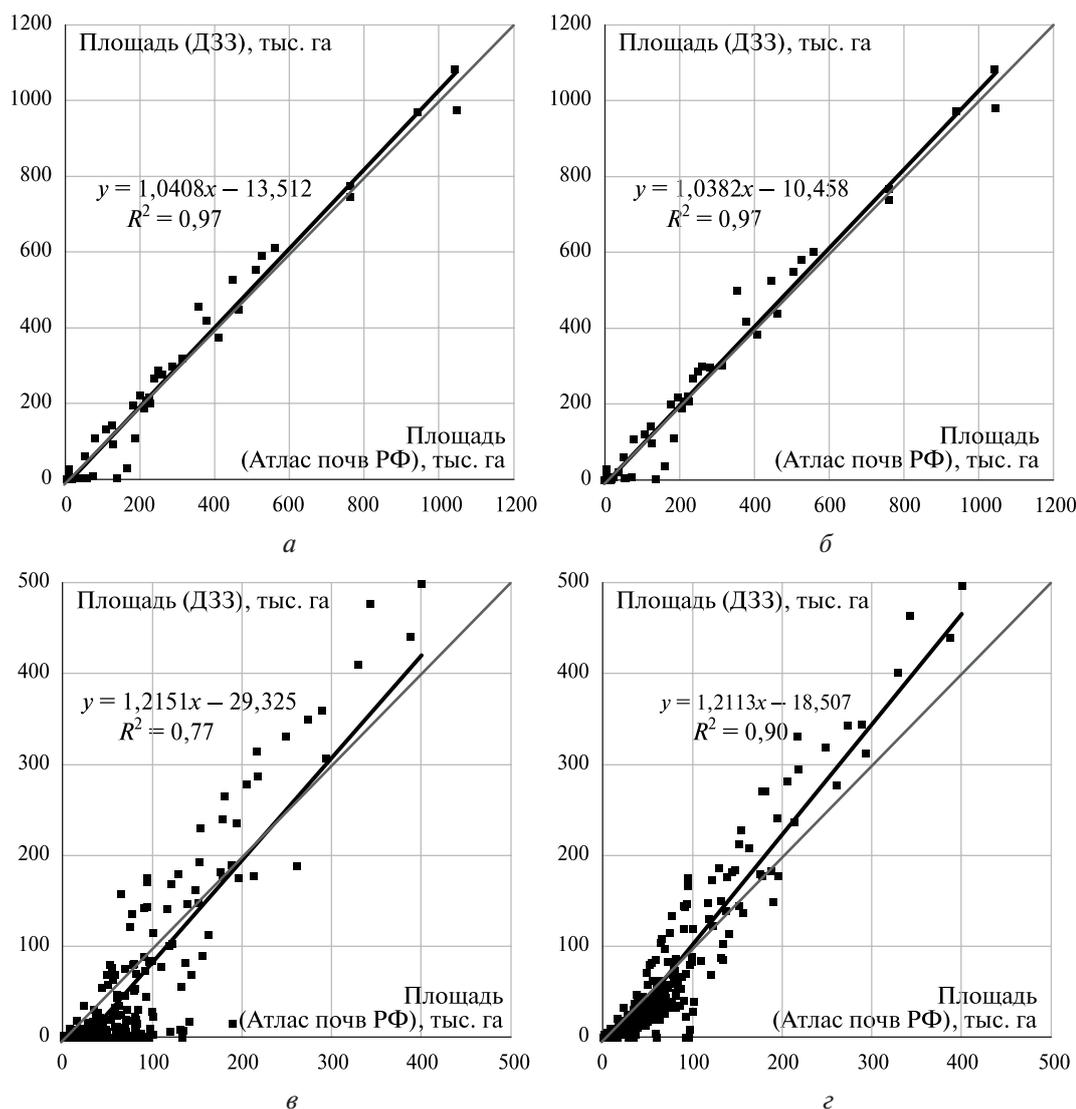


Рис. 6. Сопоставление площадей степей и пустынь по данным предыдущей (а, в) и новой версий карт ИКИ РАН (б, г) с площадями пастбищ в муниципальных районах пустынных (а, б) и степных биомов (в, г) согласно почвенно-географической базе данных РФ (Атлас почв РФ)

Заключение

В результате исследования разработана новая серия карт степной и пустынной растительности в России, точность которых в степных и пустынных биомов составляет 78 % в сравнении с выделенными экспертами контурами сохранившихся степей и 95 % при сопоставлении с данными о площадях пастбищ в муниципальных районах. В среднем ежегодно в России детектируется около 41,7 млн га степных и пустынных экосистем в границах февраля 2022 г., из которых 30 млн га расположены в зонах степей и пустынь. Всего выделено более 260 тыс. контуров степной и пустынной растительности средней площадью 153,9 га, в том числе 110 тыс. контуров более трёх пикселей MODIS средней площадью 371 га. Появление актуализированной карты степной и пустынной растительности открывает перспективы для развития исследований состояния этих экосистем и анализа закономерностей их динамики. Полученные данные позволяют не только уточнять площади степей и пустынь в стране, но и изучать многолетние и внутригодовые закономерности динамики их состояния как на основе полевых исследований, так и различных вегетационных индексов и других данных дистанционного зондирования.

В неморальных зонобиомах и оробиомах точность полученных карт несколько ниже по сравнению со степными и пустынными зонобиомами. Отчасти это может быть связано с отнесением луговых степей к классу лугов, а также особенностями проверочных данных. К площадям пастбищ по данным землеустройства могут причисляться не только участки степной и пустынной растительности, но и луга, особенно за пределами степной и пустынной зон. В то же время часть мезофитных вариантов степей может быть отнесена к сенокосам. Массивы степей, выделенные экспертами по спутниковым изображениям сверхвысокого разрешения, фактически включают не только степи, но и другие типы земного покрова. Поэтому отсутствие достоверных опорных данных на данный момент затрудняет повышение точности выделения степей в оробиомах и неморальных зонобиомах. Особенно это касается неморальных биомов, где степные участки наиболее фрагментированы и имеют среднюю площадь не более 40 га, а их ширина зачастую менее размеров пикселя MODIS. Увеличение пространственного разрешения используемых спутниковых данных в перспективе позволит более точно картографировать подобные мелкоконтурные степные массивы. Значительная часть луговых степей и остепнённых лугов перепутывается между собой, решением проблемы может стать выделение отдельного соответствующего класса либо создание карты степей и лугов на основе синтеза разновременных карт типов земного покрова. Также для дальнейшего совершенствования карт степной растительности в оробиомах и неморальных зонобиомах требуется продолжение работы по сбору опорных данных, в том числе их наземной верификации.

Работа выполнена в рамках темы ИКИ РАН «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, создание системы учёта данных о потоках климатически активных веществ в бюджете углерода в лесах и других наземных экосистемах» (госрегистрация № 124060500032-7) с использованием сервиса «Vega-Science» и инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг», поддерживаемого в рамках темы ИКИ РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

Авторы благодарят доктора географических наук Г. Н. Огурееву за предоставленную электронную карту биомов России, Д. Е. Аксёнова, Д. Б. Кольцова, Н. В. Рогову, кандидата биологических наук В. Э. Скворцова, доктора биологических наук А. Ю. Королюка, кандидата биологических наук Н. А. Дулепову, С. В. Титову, К. Н. Кобякова за электронную карту сохранившихся степных массивов, подготовленную в рамках Степного проекта ПРООН/ГЭФ/Минприроды России.

Литература

1. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. Барталев С. А., Ворушилов И. И., Егоров В. А. Построение и радиометрическая нормализация безоблачных композитных спутниковых изображений покрытой снегом земной поверхности для мониторинга лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 57–69. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-57-69.
3. Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы / под ред. Г. Н. Огуреевой. М.: ФГБУ «ИГКЭ», 2020. 623 с.
4. Блэкберн А. А. Предварительная инвентаризация степных территорий с помощью программы QGIS (на примере Шахтерского района Донецкой Народной Республики) // Пром. ботаника. 2018. Т. 18. № 4. С. 25–31.
5. Голубятников Л. Л., Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О. Оценка баланса углерода степных экосистем России // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 1. С. 71–87. DOI: 10.31857/S0002351523010042.
6. Зонн И. С., Трофимов И. А., Шамсутдинов З. Ш., Шамсутдинов Н. З. Земельные ресурсы аридных территорий России // Аридные экосистемы. 2004. Т. 10. № 22–23. С. 87–101.
7. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2006 года: в 9 т. Т. 3: Земельные ресурсы и их использование. М.: ИИЦ «Статистика России», 2008. 312 с.

8. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года: в 8 т. Т. 3: Земельные ресурсы и их использование. М.: ИИЦ «Статистика России», 2018. 307 с.
9. Карта «Биомы России». 1:7 500 000 / гл. ред. Г. Н. Огуреева. М.: ООО «Финансовый и организационный консалтинг», 2015.
10. *Королюк А. Ю., Макунина Н. И.* Настоящие степи Алтае-Саянской горной области (порядок *Stipetalia krylovii* Kononov, Gogoleva et Mironova 1985) // Растительный мир Азиатской России. 2009. № 2 (4). С. 43–53.
11. *Лулян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
12. *Миклашевич Т. С., Барталев С. А., Плотников Д. Е.* Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 143–154. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
13. *Намзалов Б. Б.* Пространственная структура растительности богаторазнотравно-ковыльных степей юга Западно-Сибирской равнины (Северная Кулунда) // Геоботаническое картографирование. 1996. № 1994–1995. С. 16–33.
14. Национальный атлас почв Российской Федерации / гл. ред. С. А. Шоба. М.: Изд-во «Астрель», 2011. 632 с.
15. *Огуреева Г. Н., Бочарников М. В.* Оробиомы как базовые единицы региональной оценки биоразнообразия горных территорий // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1. № 2. С. 52–81.
16. *Огуреева Г. Н., Микляева И. М., Бочарников М. В., Дудов С. В., Тувшинтогтог И.* Крупномасштабное картографирование Дауро-Монгольских степей для целей мониторинга // Аридные экосистемы. 2009. Т. 15. № 2(38). С. 18–27.
17. Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации / под ред. А. А. Романовской. М.: ИГКЭ, ООО «Принт», 2023. 343 с.
18. *Павлейчик В. М., Святоха Н. Ю., Сивохин Ж. Т.* Современные тенденции в формировании массивов залежных земель как предпосылка к усложнению пожарных обстановок в Заволжско-Уральском регионе // Материалы международ. конф. «ИнтерКарто. ИнтерГИС». Т. 30. Ч. 2. М.: Геогр. фак. МГУ, 2024. С. 236–251. DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-236-251.
19. *Рогова Н. В., Скворцов В. Э.* Итоги инвентаризации степей в восточной части Европейской России // Степной бюл. 2016. № 47–48. С. 35–43.
20. *Сафронова И. Н.* Фитоэкологическое картографирование Северного Прикаспия // Геоботаническое картографирование. 2002. № 2001–2002. С. 44–65. DOI: 10.31111/geobotmap/2001-2002.44.
21. *Синельникова К. П., Берденгалиева А. Н., Матвеев Ш. и др.* Картографирование пахотных земель в агроландшафтах Волгоградской области по данным дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 5. С. 85–96. DOI: 10.31857/S0205961423050081.
22. *Смелянский И., Елизаров А., Соболев Н., Благовидов А.* Стратегия сохранения степей России: позиция неправительственных организаций. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2006. 36 с.
23. *Терехин Э. А.* Изменение лесистости овражно-балочных систем юга Среднерусской возвышенности за последние десятилетия // Науч. вед. Белгородского гос. ун-та. Сер.: Естественные науки. 2018. Т. 42. № 2. С. 223–230. DOI: 10.18413/2075-4671-2018-42-2-223-230.
24. *Терехин Э. А.* Особенности лесовозобновления на залежных землях Среднерусской лесостепи // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 4. С. 594–604. DOI: 10.31857/S2587556622040112.
25. *Тишков А. А.* Новые подходы к сохранению степей староосвоенных черноземных регионов России // Вопросы степеведения. 2024. № 1. С. 22–31. DOI: 10.24412/2712-8628-2024-1-22-31.
26. *Трофимов И. А., Трофимова Л. С., Яковлева Е. П.* О применении информационных технологий в картографировании агрогеосистем // Тр. Ин-та геологии Дагестанского науч. центра РАН. 2015. № 65. С. 26–29.
27. *Чибилёв А. А.* Степная Евразия: региональный обзор природного разнообразия. 2-е изд., перераб. и доп. Оренбург: Ин-т степи Уральского отд-ния Российской акад. наук, 2017. 324 с.
28. *Шинкаренко С. С., Барталев С. А.* Картографирование соровых понижений и солончаков в Северном Прикаспии на основе многолетних данных Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 153–165. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-153-165.
29. *Шинкаренко С. С., Дорошенко В. В., Берденгалиева А. Н., Комарова И. А.* Динамика горимости аридных ландшафтов России и сопредельных территорий по данным детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 149–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164.

30. Шинкаренко С. С., Дорошенко В. В., Берденгалиева А. Н. Динамика площади гарей в зональных ландшафтах юго-востока европейской части России // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2022. Т. 86. № 1. С. 122–133. DOI: 10.31857/S2587556622010113.
31. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Биарсланов А. Б. Изменения площадей открытых песков и дефлированных пастбищ на юго-востоке европейской части России в 2023 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 321–330. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-321-330.
32. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. V. 5. No. 1. P. 55–64. DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.
33. Bontemps S., Boettcher M., Brockmann C. et al. Multi-year global land cover mapping at 300 m and characterization for climate modelling: Achievements of the Land Cover component of the ESA Climate Change Initiative // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives. 2015. V. XL-7/W3. P. 323–328. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-323-2015.
34. Li Z., Huffman T., McConkey B., Townley-Smith L. Monitoring and modeling spatial and temporal patterns of grassland dynamics using time-series MODIS NDVI with climate and stocking data // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 138. P. 232–244. DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.020.
35. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al. Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
36. Pavleychik V.M., Chibilev A.A., Padalko Yu.A. Pyrological situation in the steppes of Northern Eurasia // Doklady Earth Sciences. 2022. V. 505. No. 2. P. 591–597. DOI: 10.1134/S1028334X22080141.
37. Prishchepov A.V., Myachina K.V., Kamp J. et al. Multiple trajectories of grassland fragmentation, degradation, and recovery in Russia's steppes // Land Degradation and Development. 2021. V. 32. No. 11. P. 3220–3235. DOI: 10.1002/ldr.3976.
38. Safronova I.N., Kalmykova O.G., Stepanova N.Yu. Trans-Volga–Trans-Ural Steppes of the northern subzone of the steppe zone: Features of modern formation diversity // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. No. 4. P. 255–260. DOI: 10.1134/S2079096120040174.
39. Safronova I.N., Stepanova N.Yu., Karimova T.Yu. et al. The map of the current vegetation on the territory of distribution of the population of *Saiga tatarica tatarica* L. in the North-Western Caspian region // Arid Ecosystems. 2023. V. 13. No. 3. P. 276–284. DOI: 10.1134/S2079096123030113.
40. Shinkarenko S.S., Vypritskiy A.A., Vasilchenko A.A., Berdengalieva A.N. Analysis of anthropogenic influence on desertification processes in the Northern Caspian region according to satellite data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2023. V. 59. No. 9. P. 1115–1125. DOI: 10.1134/S0001433823090177.
41. Slavko V.D., Andreeva O.V., Kust G.S. Assessment of the dynamics of land cover at the local level to achieve land degradation neutrality (for desertified lands of the dry-steppe Zavolzh'e) // Arid Ecosystems. 2023. V. 13. No. 1. P. 50–58. DOI: 10.1134/S2079096123010134.
42. Smelansky I.E., Tishkov A.A. The steppe biome in Russia: Ecosystem services, conservation status, and actual challenges // Eurasian Steppes. Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World. V. 6. Springer, Dordrecht, 2012. P. 45–101. DOI: 10.1007/978-94-007-3886-7_2.
43. Tishkov A., Belonovskaya E., Smelansky I. et al. Temperate grasslands and shrublands of Russia // Encyclopedia of the World's Biomes. V. 3. Elsevier, 2020. P. 725–749. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.12457-1.
44. Vasilchenko A.A. Hayfield mapping in the floodplain landscapes of Southern Russia based on multitemporal Sentinel-2 data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2023. V. 59. No. 10. P. 1474–1482. DOI: 10.1134/S000143382312023X.
45. Zolotareva N.V., Podgaevskaya E.N. Current state of mountain steppes in Sverdlovsk oblast // Russian J. Ecology. 2012. V. 43. No. 5. P. 358–366. DOI: 10.1134/S1067413612050177.

Refining the mapping of desert and steppe ecosystems in satellite-based land cover assessments of Russia's terrestrial ecosystems

S. S. Shinkarenko¹, S. A. Bartalev¹, I. A. Saigin¹, I. E. Smelyansky²

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

² *ООО Laboratory "Ecoton", Samara 443052, Russia*

Steppe and desert ecosystems in Russia possess high conservation value as habitats for rare species of flora and fauna, as well as significant climate-regulating potential, making their mapping and monitoring a priority task. However, most existing global and national satellite-derived vegetation cover maps either fail to distinguish steppe ecosystems from other herbaceous vegetation or rely on insufficiently representative reference data. This study aims to improve the mapping accuracy of steppe and desert vegetation by utilizing multi-temporal medium-resolution satellite data with cloud artifacts removed, along with a representative reference dataset derived from expert interpretation of high-resolution satellite imagery and selective ground-based verification. Using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data, we produced a series of annual land cover maps of Russia for 2001–2023 with refined delineation of steppe and desert ecosystems. Satellite-based assessments detected 41–42 million hectares of steppe and desert ecosystems annually across the country. A comparison of these results with pasture areas at the municipal district level revealed a high degree of consistency in desert and steppe biomes, where 95 % of pasture areas were correctly identified. In contrast, discrepancies were more pronounced in nemoral biomes, where mapped steppe ecosystems did not fully align with official pasture extents. These discrepancies may stem from uncertainties in land use classification, such as inclusion of meadows as pastures or mesophytic steppe variants as hayfields in land management records, as well as misclassification between meadow steppes and steppe-like meadows in remote sensing data. Additionally, in nemoral biomes, the average size of individual steppe patches was minimal, leading to a high proportion of boundary pixels. The resulting maps provide a foundation for assessing the current state of zonal vegetation in steppe and desert regions and analyzing key drivers of its dynamics.

Keywords: steppes, deserts, biomes, land cover, satellite monitoring, remote sensing

Accepted: 13.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-218-235

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
2. Bartalev S. A., Vorushilov I. I., Egorov V. A., Creation and radiometric normalisation of cloud-free composite satellite images of snow-covered terrestrial surface for forest monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 2, pp. 57–69 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-57-69.
3. *Bioraznoobrazie biomov Rossii. Ravninnye biomy* (Biodiversity of Russia's biomes. Lowland biomes), Ogureeva G. N. (ed.), Moscow: FGBU "IGKEH", 2020, 623 p. (in Russian).
4. Blackburn A. A., A preliminary inventorying of the steppe areas using QGIS program (case study of the Shakhtersk district of the Donetsk People's Republic), *Promyshlennaya botanika*, 2018, V. 18, No. 4, pp. 25–31 (in Russian).
5. Golubyatnikov L. L., Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V. O., Estimation of carbon balance in steppe ecosystems of Russia, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, V. 59, No. 1, pp. 63–77, DOI: 10.1134/S0001433823010048.
6. Zonn I. S., Trofimov I. A., Shamsutdinov Z. Sh., Shamsutdinov N. Z., Lands resources of Russia arid territories, *Aridnye ekosistemy*, 2004, V. 10, No. 22–23, pp. 87–101 (in Russian).
7. *Itogi Vserossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi perepisi 2006 goda: v 9 t. T. 3: Zemel'nye resursy i ikh ispol'zovanie* (Results of the 2006 All-Russian Agricultural Census: in 9 v. V. 3: Land resources and their use), Moscow: IITS "Statistika Rossii", 2008, 312 p. (in Russian).

8. *Itogi Vserossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi perepisi 2016 goda: v 8 t. T. 3: Zemel'nye resursy i ikh ispol'zovanie* (Results of the 2016 All-Russian Agricultural Census: in 8 v. V. 3: Land resources and their use), Moscow: IITS "Statistika Rossii", 2018, 307 p. (in Russian).
9. *Karta "Biomy Rossii". 1:7 500 000* (Map "Biomes of Russia". 1:7 500 000), Ogureeva G. N. (ed.), Moscow: "Finansovyi i organizatsionnyi konsalting", 2015.
10. Korolyuk A. Yu., Makunina N. I., True steppes of the Altai-Sayan mountain area (order *Stipetalia krylovii* Kononov, Gogoleva et Mironova 1985), *Flora and Vegetation of Asian Russia*, 2009, No. 2 (4), pp. 43–53 (in Russian).
11. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
12. Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Interpolation algorithm for the recovery of long satellite data time series of vegetation cover observation, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 6, pp. 143–154 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
13. Namzalov B. B., Spatial structure of vegetation of the forb-feathergrass steppe subzone in the Southern West-Siberian plain (Northern Kulunda), *Geobotanicheskoe kartografirovaniye*, 1996, No. 1994–1995, pp. 16–33 (in Russian).
14. *Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii* (National Soil Atlas of the Russian Federation), Shoba S. A. (ed.), Moscow: Izd. "Astrel", 2011, 632 p. (in Russian).
15. Ogureeva G. N., Bocharnikov M. V., Orobiomes as the basic units of the regional evaluation of the mountain regions biodiversity, *Ekosistemy: ekologiya i dinamika*, 2017, V. 1, No. 2, pp. 52–81 (in Russian).
16. Ogureeva G. N., Miklaeva I. M., Bocharnikov M. V., Dudov S. V., Tuvshintogkhtog I., Large scale mapping of Dauria-Mongolian steppes for purposes of monitoring, *Aridnye ekosistemy*, 2009, V. 15, No. 2(38), pp. 18–27 (in Russian).
17. *Otsenka potokov parnikovykh gazov v ekosistemakh regionov Rossiiskoi Federatsii* (Assessment of greenhouse gas fluxes in ecosystems of the regions of the Russian Federation), Romanovskaya A. A. (ed.), Moscow: IGKEH, OOO "Print", 2023, 343 p. (in Russian).
18. Pavleichik V. M., Svyatoha N. Yu., Sivohip Zh. T., Modern trends in the formation of fallow land arrays as a prerequisite for the complication of fire situations in the Volga-Ural region, *Materialy mezhdunarodnoi konf. "InterKarto. InterGIS"*, V. 30, Pt. 2, Moscow: Geograficheskii fakul'tet MGU, 2024, pp. 236–251 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2024-2-30-236-251.
19. Rogova N. V., Skvortsov V. E., Results of the steppe inventory in the eastern part of European Russia, *Stepnoi byulleten'*, 2016, No. 47–48, pp. 35–43 (in Russian).
20. Safronova I. N., Phytocological mapping of the Northern Caspian region, *Geobotanical mapping*, 2002, No. 2001–2002, pp. 44–65 (in Russian), DOI: 10.31111/geobotmap/2001-2002.44.
21. Sinelnikova K. P., Berdengalieva A. N., Matveev Sh. et al., Mapping arable lands in agricultural landscapes of Volgograd Region according to remote sensing data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, V. 59, No. 10, pp. 1494–1502, DOI: 10.1134/S0001433823120228.
22. Smelyansky I., Elizarov A., Sobolev N., Blagovidov A., *Strategiya sokhraneniya stepei Rossii: pozitsiya nepravitel'stvennykh organizatsii* (Strategy for the conservation of the steppes of Russia: the position of non-governmental organizations), Moscow: Izd. Tsentra okhrany dikoi prirody, 2006, 36 p. (in Russian).
23. Terekhin E. A., Changes in forest cover of ravines-balks network in the south of the Central Russian Upland in recent decades, *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki*, 2018, V. 42, No. 2, pp. 223–230 (in Russian), DOI: 10.18413/2075-4671-2018-42-2-223-230.
24. Terekhin E. A., Reforestation on abandoned agricultural lands in the Central Russian forest-steppe, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2022, V. 86, No. 4, pp. 594–604 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622040112.
25. Tishkov A. A., New approaches to the conservation of steppes in the old-developed chernozem regions of Russia, *Voprosy stepovedeniya*, 2024, No. 1, pp. 22–31 (in Russian), DOI: 10.24412/2712-8628-2024-1-22-31.
26. Trofimov I. A., Trofimova L. S., Yakovleva E. P., On the application of information technologies in mapping of the agroecosystems, *Trudy Instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2015, No. 65, pp. 26–29 (in Russian).
27. Chibilev A. A., *Stepnaya Evraziya: regional'nyi obzor prirodnogo raznoobraziya* (Steppe Eurasia: a regional review of natural diversity), 2nd ed., Orenburg: Institut stepi Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk, 2017, 324 p. (in Russian).
28. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Mapping of sor depressions and solonchaks in the Northern Caspian region based on long-term Landsat data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 153–165 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-153-165.

29. Shinkarenko S. S., Doroshenko V. V., Berdengalieva A. N., Komarova I. A., Dynamics of arid landscapes burning in Russia and adjacent territories based on active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 1, pp. 149–164 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164.
30. Shinkarenko S. S., Doroshenko V. V., Berdengalieva A. N., Burned areas dynamics in zonal landscapes of the south-east of the European part of Russia, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2022, V. 86, No. 1, pp. 122–133 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622010113.
31. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Biarslanov A. B., Changes in the areas of open sands and deflated pastures in the southeastern part of European Russia in 2023, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 321–330 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-321-330.
32. Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Khvostikov S. A., A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, *Remote Sensing Letters*, 2014, V. 5, No. 1, pp. 55–64, DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.
33. Bontemps S., Boettcher M., Brockmann C. et al., Multi-year global land cover mapping at 300 m and characterization for climate modelling: Achievements of the Land Cover component of the ESA Climate Change Initiative, *Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives*, 2015, V. XL-7/W3, pp. 323–328, DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-323-2015.
34. Li Z., Huffman T., McConkey B., Townley-Smith L., Monitoring and modeling spatial and temporal patterns of grassland dynamics using time-series MODIS NDVI with climate and stocking data, *Remote Sensing of Environment*, 2013, V. 138, pp. 232–244, DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.020.
35. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al., Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
36. Pavleychik V. M., Chibilev A. A., Padalko Yu. A., Pyrological situation in the steppes of Northern Eurasia, *Doklady Earth Sciences*, 2022, V. 505, No. 2, pp. 591–597, DOI: 10.1134/S1028334X22080141.
37. Prishchepov A. V., Myachina K. V., Kamp J. et al., Multiple trajectories of grassland fragmentation, degradation, and recovery in Russia's steppes, *Land Degradation and Development*, 2021, V. 32, No. 11, pp. 3220–3235, DOI: 10.1002/ldr.3976.
38. Safronova I. N., Kalmykova O. G., Stepanova N. Yu., Trans-Volga–Trans-Ural Steppes of the northern subzone of the steppe zone: Features of modern formation diversity, *Arid Ecosystems*, 2020, V. 10, No. 4, pp. 255–260, DOI: 10.1134/S2079096120040174.
39. Safronova I. N., Stepanova N. Yu., Karimova T. Yu. et al., The map of the current vegetation on the territory of distribution of the population of *Saiga tatarica tatarica* L. in the North-Western Caspian region, *Arid Ecosystems*, 2023, V. 13, No. 3, pp. 276–284, DOI: 10.1134/S2079096123030113.
40. Shinkarenko S. S., Vypritskiy A. A., Vasilchenko A. A., Berdengalieva A. N., Analysis of anthropogenic influence on desertification processes in the Northern Caspian region according to satellite data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, V. 59, No. 9, pp. 1115–1125, DOI: 10.1134/S0001433823090177.
41. Slavko V. D., Andreeva O. V., Kust G. S., Assessment of the dynamics of land cover at the local level to achieve land degradation neutrality (for desertified lands of the dry-steppe Zavolzh'e), *Arid Ecosystems*, 2023, V. 13, No. 1, pp. 50–58, DOI: 10.1134/S2079096123010134.
42. Smelansky I. E., Tishkov A. A., The steppe biome in Russia: Ecosystem services, conservation status, and actual challenges, In: *Eurasian Steppes. Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World*, V. 6, Springer, Dordrecht, 2012, pp. 45–101, DOI: 10.1007/978-94-007-3886-7_2.
43. Tishkov A., Belonovskay E., Smelansky I. et al., Temperate grasslands and shrublands of Russia, In: *Encyclopedia of the World's Biomes*, V. 3, Elsevier, 2020, pp. 725–749, DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.12457-1.
44. Vasilchenko A. A., Hayfield mapping in the floodplain landscapes of Southern Russia based on multitemporal Sentinel-2 data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, V. 59, No. 10, pp. 1474–1482, DOI: 10.1134/S000143382312023X.
45. Zolotareva N. V., Podgaevskaya E. N., Current state of mountain steppes in Sverdlovsk oblast, *Russian J. Ecology*, 2012, V. 43, No. 5, pp. 358–366, DOI: 10.1134/S1067413612050177.