Картографирование соровых понижений и солончаков в Северном Прикаспии на основе многолетних данных Landsat

С.С. Шинкаренко 1, С.А. Барталев 1,2

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru
² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Россия

Соровые понижения (соры) различного происхождения и сопряжённые с ними гидроморфные солончаки являются характерными объектами аридных ландшафтов. В России они широко распространены на юго-востоке европейской части, а также на юге Западной Сибири и в Забайкалье. Соры представляют собой понижения, на дне которых активно развиваются процессы солончакообразования, нередко находятся постоянные или пересыхающие солёные и солоноватые водоёмы. Поверхность солончаков практически лишена растительного покрова, только несколько наиболее устойчивых видов растений способны выдерживать такой высокий уровень засоления. В последние годы на юго-востоке европейской части России интенсифицировались процессы опустынивания вплоть до полного исчезновения растительности и обнажения подвижных песков и котловин выдувания из-за засух и чрезмерных пастбишных нагрузок. При спутниковом мониторинге этих процессов нередко открытые пески перепутываются с сорами и солончаками, которые лишены растительного покрова в силу естественных причин, а не из-за воздействия неблагоприятных факторов. По этой причине необходима разработка подходов к разделению по данным дистанционного зондирования открытых песков и дефлированных площадей и природных образований — соров и солончаков. В работе предложен метод картографирования соров на основе среднемноголетних значений NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) и NDWI (англ. Normalized Difference Water Index — нормализованный разностный водный индекс) за 1984—2022 гг., рассчитываемых по данным Landsat. Предложены пороговые значения этих индексов для отделения соров от открытых песков и постоянных водоёмов. Выявленная площадь соровых понижений и солончаков в Астраханской обл., Ставропольском крае, республиках Дагестан и Калмыкия составила около 245 тыс. га, что превышает площади открытых песков и дефлированных территорий до периода интенсификации процессов опустынивания в 2019-2022 гг. Разработанные электронные карты также открывают перспективы дальнейшего изучения соров как природных объектов, поскольку их генезис и пространственное распространение исследованы ещё недостаточно.

Ключевые слова: аридные ландшафты, дистанционное зондирование, соры, солончаки, юг России, Landsat

Одобрена к печати: 28.08.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-153-165

Введение

Соровые понижения и приуроченные к ним солончаки являются характерными элементами ландшафтов засушливой зоны и широко распространены на территории Прикаспийской низменности, юге Западной Сибири и в Средней Азии. Согласно определению Пищулова (2013), сор — «это бессточное понижение различного генезиса с временным пересыхающим водоёмом и активным развитием засоления поверхностной морфолитосистемы, приводящим к образованию солончаков с ярко выраженным солончаковым горизонтом». Ландшафты полупустынной и пустынной зон, к которым относится Северный Прикаспий, подвержены процессам деградации из-за регулярных засух и неконтролируемого выпаса скота (Титкова, Золотокрылин, 2022; Шинкаренко, 2019; Kulik et al., 2015, 2020), поэтому проблема разделения естественных солончаков и лишённых растительного покрова участков из-за дефляции и чрезмерного выпаса домашнего скота при их спутниковом мониторинге здесь актуальна. Для солончаков характерна крайне разреженная растительность или её полное отсутствие

в силу естественных причин, из-за чего они могут быть ошибочно отнесены к деградированным в результате антропогенного воздействия площадям при их картографировании по данным дистанционного зондирования. В последние годы на юге европейской части России интенсифицировалось опустынивание пастбищ под влиянием неблагоприятных гидротермических условий и чрезмерного выпаса домашнего скота (Шинкаренко, Барталев, 2020а, 2021), поэтому возникает необходимость спутникового мониторинга этих процессов. Соровые понижения и солончаки при этом должны картографироваться отдельно, поскольку отсутствие на них растительности является следствием их природных особенностей, а не антропогенного воздействия (Виноградов, 1996; Zonn et al., 2017). Большинство исследований процессов опустынивания и динамики состояния растительности по данным дистанционного зондирования не учитывают наличие естественных солончаков без растительного покрова (Барталев и др., 2016; Gunin et al., 2019; Kulik et al., 2015; Zolotokrylin, Titkova, 2011).

По имеющимся данным (Берденгалиева, Дорошенко, 2022), на территории Северо-Западного Прикаспия расположено примерно 240 тыс. га соровых понижений и солончаков, что сопоставимо с площадью подвижных песков и дефлированных земель на этой территории в отдельные годы (Шинкаренко, 2019; Шинкаренко и др., 2022). Таким образом, эта категория земель должна учитываться при мониторинге процессов опустынивания, иначе оценки площадей лишённых растительного покрова территорий вследствие воздействия негативных факторов будут существенно завышены. Имеющиеся работы по картографированию соровых понижений и солончаков опираются на методы экспертного дешифрирования спутниковых изображений высокого и сверхвысокого пространственного разрешения (например, Берденгалиева, Дорошенко, 2022; Берденгалиева и др., 2022; Дорошенко, 2022). Поскольку границы соров и солончаков имеют достаточно чёткие дешифровочные признаки, а также слабо подвержены многолетним изменениям, то подобный подход оправдан. Единожды полученные границы на основе визуального дешифрирования спутниковых изображений могут потом использоваться в течение нескольких лет без существенной корректировки. Недостаток такого метода заключается в его значительной трудоёмкости, из-за чего расширение границ исследований сопряжено с большими временными затратами. Только в Северо-Западном Прикаспии идентифицировано около 20 тыс. участков соров и солончаков (Берденгалиева, Дорошенко, 2022), в то время как в Волго-Уральском междуречье их значительно больше. В связи с этим возникает необходимость разработки метода, который позволил бы получить электронную карту соровых понижений и солончаков с меньшими трудозатратами. Несмотря на довольно широкое распространение соров, их особенности и генезис изучены ещё недостаточно, поэтому электронные карты их распределения могут способствовать дальнейшим исследованиям (Пищулов, 2013).

Цель данной работы заключается в разработке метода картографирования соров и солончаков и их последующее картографирование на российской части Северного Прикаспия для отделения от площадей, лишённых растительного покрова вследствие негативного воздействия природных и антропогенных факторов.

Объект, материалы и методы исследования

Образование бессточных соровых понижений связывают с эрозионной деятельностью ветра и воды, часть соров приурочена к древним руслам рек. Возникновение солончаков на поверхности соров связано с аккумуляцией солей из стекающих талых и дождевых вод, а также из близкорасположенных минерализованных грунтовых вод в условиях выпотного водного режима (Пищулов, 2013). Регион исследований включает Астраханскую обл., Ставропольский край, республики Дагестан и Калмыкия. В северной части Прикаспийской низменности, в зоне светло-каштановых почв, понижения рельефа (падины и западины), наоборот, находятся в лучших условиях увлажнения из-за перераспределения атмосферных осадков при относительно глубоком залегании минерализованных грунтовых вод, поэтому представлены лугово-каштановыми почвами и являются более продуктивными по сравнению с окружающим

ровным пространством (Абатуров, Конюшкова, 2020; Рулев и др., 2017). Только наиболее крупные понижения рельефа в таких условиях покрыты солончаками, например сопряжённые с районами соляно-купольной тектоники озёра Эльтон и Баскунчак или реликты отступившего Хвалынского моря, такие как сор Солёные грязи Хаки в Западном Казахстане.

Поверхность соров в зависимости от условий и времени года может быть представлена водой, открытой увлажнённой почвой, корковым, такыровидным или пухлым солончаком (Пишулов, 2013), а также разреженной растительностью, состоящей из наиболее солеустойчивых гипергалофитов, например Salicornia perennans (солерос солончаковый), Suaeda salsa (сведа солончаковая), Halocnemum strobilaceum (сарсазан шишковатый), пик развития которых приходится на вторую половину лета. По периферии солончаков также могут расти несколько видов гребенщика (кустарники Tamarix spp.) (Лазарева и др., 2017). На побережье Каспия из-за падения его уровня на обсыхающих мелководьях также активно происходят процессы солончакообразования (Гасанова и др., 2015; Стасюк, Кравцова, 2012). Соотношение площадей водной поверхности, растительности и открытой почвы меняется в течение года, а также существенно зависит от площади и глубины соров. Поэтому классификация соров и солончаков по одномоментному изображению затруднена, так как эти объекты могут иметь значительные различия спектрально-отражательных свойств в зависимости от текущего покрова (рис. 1).



Рис. 1. Соровые понижения в Калмыкии: заполненные водой (*a*), пересохшее (*б*), июнь 2021 г., и в Дагестане (*в*), апрель 2023 г.; красная стрелка — солончаки, жёлтая — открытые пески

Общим для всех соров и солончаков признаком является практически полное отсутствие растительного покрова, поэтому их выделение возможно на основе анализа вегетационных индексов, например NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс). Наибольший контраст с покрытым растительностью

окружающим пространством при этом может быть достигнут в весенний период, когда соры максимально заполнены водой, а окружающий ландшафт покрыт активно вегетирующими растениями (Shadrina et al., 2013). В условиях северных пустынь и опустыненных степей это май и первая половина июня (Шинкаренко, Барталев, 2020б). При этом возможно перепутывание соров с постоянными искусственными и естественными водоёмами, а также открытыми песками и дефлированными территориями без растительного покрова. Отличительной особенностью соров по сравнению с постоянными водоёмами является нерегулярное наполнение водой, а также значительно меньшие глубины (Уланова, 2004). По сравнению с открытыми песками соры практически не зарастают растительностью в течение многих лет, тогда как на протяжении последних десятилетий очаги песков зарастали и появлялись вновь, меняя своё местоположение (Рыбашлыкова и др., 2019; Шинкаренко, 2019). Также периодическое заполнение соровых понижений водой или значительное увлажнение гидроморфных солончаков позволяют отделить их по спектрально-отражательным признакам от многолетних песков и дефлированных участков на основе водного индекса NDWI (англ. Normalized Difference Water Index — нормализованный разностный водный индекс), рассчитываемого как нормализованная разность коэффициентов спектральной яркости в зелёном и ближнем инфракрасном диапазонах (McFeeters, 1996).

Таким образом, основой для картографирования соров могут стать многолетние спутниковые данные и полученные на их основе среднемноголетние значения NDVI и NDWI. Значения NDVI позволяют выделить участки без растительного покрова, а использование NDWI необходимо для разделения периодически заполняемых водой соров, приуроченных к ним гидроморфных солончаков, постоянных (ежегодно наполняемых) водоёмов, открытых песков и дефлированных территорий без растительного покрова. В последние годы из-за пыльных бурь некоторые солончаки могли заноситься песком (Гасанов и др., 2019; Дорошенко, 2022), по многолетним данным подобные объекты также идентифицируются как соры. Схема картографирования представлена на рис. 2.

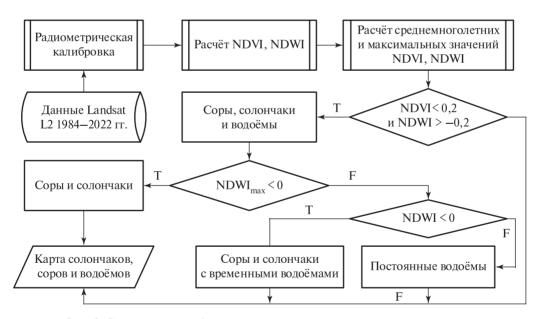


Рис. 2. Схема картографирования соровых понижений и солончаков

Пороговые коэффициенты для значений NDVI и NDWI получены эмпирически путём сравнения результатов со спутниковыми изображениями высокого разрешения, а также электронными картами соровых понижений (Берденгалиева и др., 2022), озёр-ильменей (Шинкаренко и др., 2021), открытых песков и дефлированных площадей (Шинкаренко и др., 2022) для территории Чёрных земель в Калмыкии и Астраханской обл. В работе также выполнено сравнение распределения площадей соров по данным информационных продуктов

типов земного покрова GLC30 (англ. GlobeLand30 dataset) (Chen J. et al., 2014), ESRI (англ. Environmental Systems Research Institute) Land cover (Karra et al., 2021), ESA (англ. European Space Agency) WorldCover (Zanaga et al., 2021), FROM-GLC10 (Chen B. et al., 2019) на 2020 г. Легенда этих продуктов включает водные объекты, лес, травянистую растительность, водноболотные угодья, пашни, кустарники, застройку, открытые почвы. Соответственно, соры отражаются как совокупность нескольких указанных классов.

Средняя площадь отдельных соров и солончаков в Северо-Западном Прикаспии составляет 12,3 га (Берденгалиева, Дорошенко, 2022), что существенно ограничивает перечень пригодных для их картографирования данных дистанционного зондирования. Достаточным пространственным разрешением среди открытых спутниковых данных обладают только системы Landsat и Sentinel-2. Спутниковые изображения Landsat имеют достаточно большую глубину архива, так как данные разрешения 30 м/пиксель доступны с 1984 г., что становится существенным преимуществом перед данными Sentinel-2, которые имеют более высокое пространственное разрешение, но доступны только с 2015 г. Глубина архива важна для картографирования соров в регионе исследований, поскольку значительная часть открытых песчаных массивов, существующих сейчас, была образована только в последние несколько лет. Также большая часть очагов опустынивания середины 80-х гг. прошлого века в настоящее время восстановилась благодаря организации системы особо охраняемых природных территорий и проведению фитомелиоративных мероприятий (Рыбашлыкова и др., 2019; Шинкаренко, 2019), в то время как соры и солончаки не имели растительного покрова на протяжении всего практически сорокалетнего периода, на который доступны спутниковые изображения Landsat-5, -7...-9. Использовались спутниковые данные Landsat за период 1984—2022 гг. с интервалом 5-7 лет, прошедшие процедуры коррекции атмосферных искажений и радиометрической калибровки. Учитывались только объекты площадью более трёх пикселей Landsat.

Результаты и обсуждение

Результат картографирования соров, солончаков и водоёмов показан на puc. 3, 4 (см. с. 158). Хорошо заметно, что открытые пески, появившиеся к $2022 \, \mathrm{r.}$, но отсутствовавшие в $2013 \, \mathrm{r.}$, не были выделены.

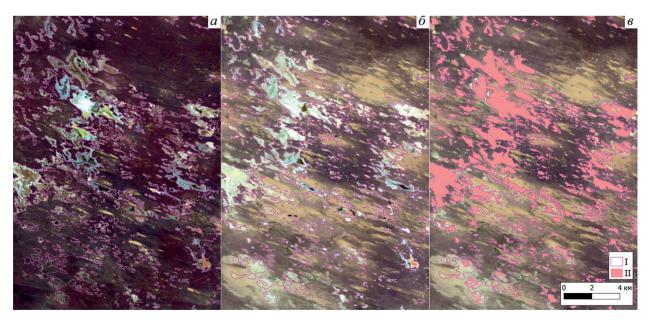


Рис. 3. Результат картографирования соровых понижений и солончаков: I — контур экспертного дешифрирования, II — предложенный метод; a — 2013 г., δ , ϵ — 2022 г.

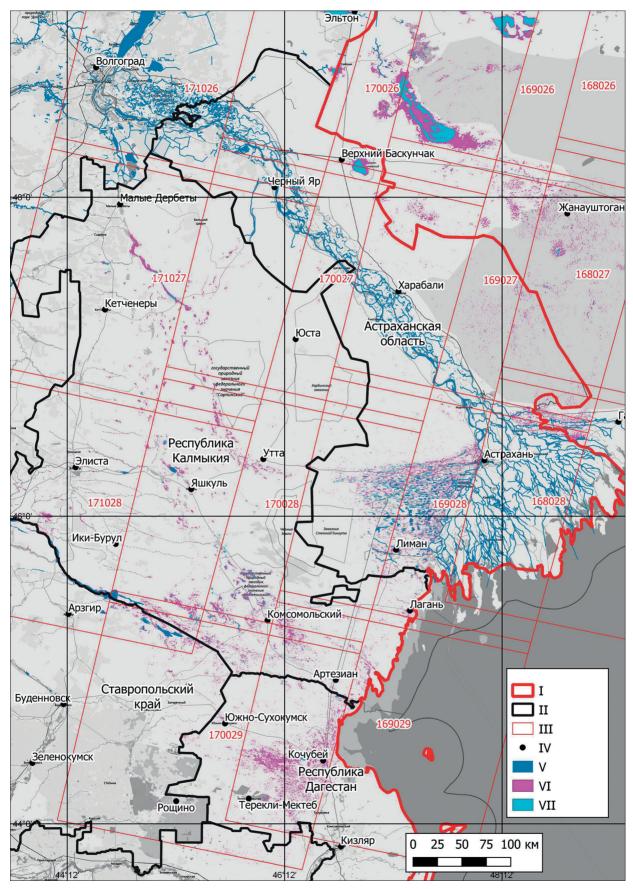


Рис. 4. Результат картографирования соровых понижений и солончаков: І — государственная граница;
 II — границы регионов; III — тайлы Landsat; IV — населённые пункты; V — постоянные водоёмы; VI — соры и солончаки; VII — соры, преимущественно покрытые водой, и солёные озёра

Идентифицировано около 53 тыс. объектов площадью более трёх пикселей Landsat. Общая площадь соровых понижений, в том числе с временными водоёмами, составила 245 тыс. га, ещё 95 тыс. га занимают постоянные водоёмы, включая пресные. Суммарно эти категории составляют всего около 2,3 % площади территории изучаемых регионов. Тем не менее площадь соров и солончаков превышает площадь подвижных песков и дефлированных территорий до периода интенсификации процессов опустынивания в 2019—2021 гг. Около половины солончаков расположено в Калмыкии (101,4 тыс. га солончаков, 25,1 тыс. га постоянных и временных водоёмов), также значительны их площади в Астраханской обл. (61,8 тыс. га солончаков, 57,1 тыс. га водоёмов) и Дагестане (63,8 тыс. га солончаков, 2,5 тыс. га водоёмов). В Ставропольском крае зафиксировано 18,1 тыс. га солончаков и 10,2 тыс. га постоянных и временных водоёмов.

По данным работы (Берденгалиева, Дорошенко, 2022), полученным экспертным дешифрированием, соры (без разделения по наличию постоянного или временного водоёма) в Калмыкии занимают 155,6 тыс. га, в Ставропольском крае — 47,5 тыс. га, в Дагестане — 23,3 тыс га. При этом в упомянутом исследовании не учтены огромные массивы солончаков между сёлами Кочубей и Терекли-Мектеб в Дагестане площадью около 50 тыс. га, а также прибрежные солончаки Каспийского моря. По остальным регионам, кроме Дагестана, в результате предложенного подхода идентифицированы меньшие площади соров и солончаков по сравнению с экспертным дешифрированием. Это может быть связано с тем фактом, что соровые понижения имеют явные дешифровочные признаки независимо от наличия в них растительного покрова, например выходы солей на поверхности почвы (Дорошенко, 2022), поэтому были картографированы не только открытые солончаки, но и покрытые галофитной растительностью (см. puc. 3). В то время как по данным NDVI выделялись только солончаки без растительного покрова. Это подтверждается сопоставлением результатов экспертного дешифрирования соровых понижений для Калмыкии по данным (Берденгалиева и др., 2022) и информационных продуктов типов земного покрова высокого пространственного разрешения GLC30, ESRI LandCover, ESA WorldCover и FROM-GLC10 (рис. 5, см. с. 160).

Распределение площади типов земного покрова в границах соров и солончаков

Тип земного покрова	Площадь, %				
	Информационные продукты				
	GLC30	ESRI	FROM-GLC10	ESA	Предложенный метод
Водно-болотные угодья	32	1	2	4	0
Вода	9	4	11	3	6
Застройка	0	0	10	0	0
Пашни	0	1	3	0	0
Открытые почвы	1	23	25	28	45
Травянистая растительность	58	71	49	65	49

По многолетним данным NDVI, около половины площади выделенных экспертным дешифрированием соровых понижений занято растительностью разной сомкнутости (*таблица*). Согласно указанным выше информационным продуктам типов земного покрова, поверхность соров представлена преимущественно травянистой растительностью (49–70%), открытыми почвами (до 28%), водной поверхностью (3–11%) и водно-болотными угодьями (ВБУ). Около 30% соров, по данным GLC30, представлено ВБУ, что может быть связано с наличием временных солёных мелководных водоёмов, которые относятся к ВБУ согласно Рамсарской конвенции (Конвенция о водно-болотных угодьях, имеющих международное значение главным образом в качестве местообитаний водоплавающих птиц (*англ*. Convention on Wetlands)). По данным FROM-GLC10 ошибочно зафиксировано 10% застройки.

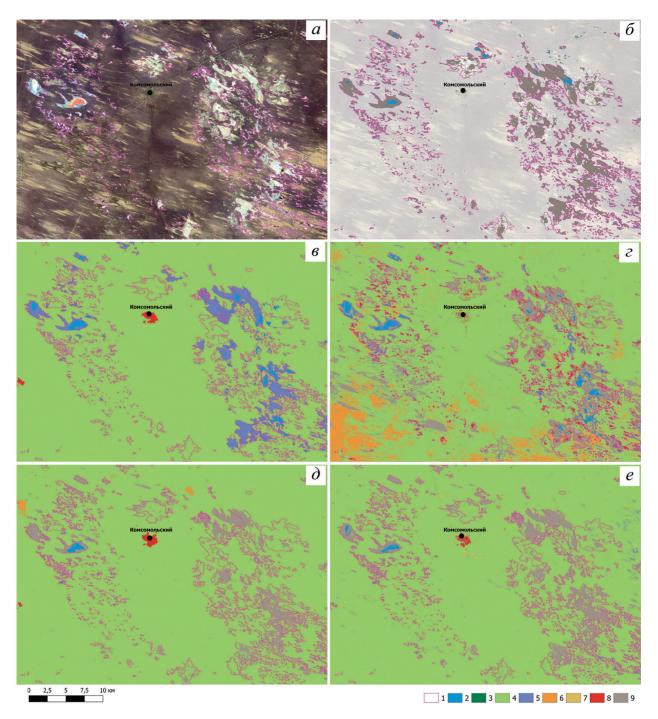


Рис. 5. Сравнение результатов картографирования на основе разных подходов и данных в окрестностях пос. Комсомольский, Калмыкия: a — спутниковое изображение Landsat-8 30.05.2022 и экспертное дешифрирование; δ — предложенный в данной работе метод; ϵ — GLC30; ϵ — FROM-GLC; δ — ESRI; ϵ — ESA; 1 — контуры по экспертному дешифрированию, 2 — водные объекты, 3 — леса, 4 — травянистая растительность, 5 — водно-болотные угодья, 6 — пашни, 7 — кустарники, 8 — застройка, 9 — открытые почвы

Пороговые значения среднемноголетних NDVI и NDWI, предложенные для российской части Северного Прикаспия, могут не подойти для других территорий, так как по мере нарастания аридности биомасса растительности снижается, соответственно, различия NDVI между сорами и окружающим пространством будут уменьшаться. Также будет изменяться наполняемость соровых понижений водой и влажность гидроморфных солончаков, из-за чего неизбежны и различия значений NDWI. Использование пороговых значений, подобранных

экспертным методом, позволяет осуществлять картографирование без опорной выборки. При наличии информации для обучения алгоритмов классификации можно для картографирования солончаков и соров использовать набор данных дистанционного зондирования, включающий как отдельные спектральные каналы, так и среднемноголетние значения NDVI и NDWI. Это направление требует дальнейшей проработки.

Поскольку основное отличие соров и гидроморфных солончаков от открытых песков и других лишённых растительного покрова территорий заключается в больших среднемноголетних значениях NDWI, то отделение соров от опустыненных территорий при картографировании последних возможно с использованием только NDWI. Для этого значения NDWI могут быть использованы в качестве признаков при классификации открытых песков и других участков без растительности. Если же анализируется только динамика площадей опустынивания начиная с некоторого начального отрезка времени, то соры и солончаки существенно на изменение этих площадей не повлияют, так как их границы относительно стабильны.

Заключение

Разработанный метод позволяет достаточно эффективно картографировать соровые понижения и сопряжённые с ними солончаки на основе многолетних данных NDVI и NDWI. Сравнение полученных данных с результатами экспертного дешифрирования показало, что около половины выделенных вручную контуров солончаков и соров регулярно зарастает растительностью, что также согласуется с проанализированными информационными продуктами типов земного покрова сопоставимого пространственного разрешения.

В результате исследования выявлено, что площадь соров и солончаков превышает площадь подвижных песков и дефлированных территорий до периода интенсификации процессов опустынивания в 2019—2021 гг. Общая площадь соровых понижений с временными водоёмами составила 245 тыс. га, ещё 95 тыс. га занимают постоянные, в том числе пресные, водоёмы. Около половины солончаков расположено в Калмыкии, также значительны их площади в Астраханской обл. и Дагестане. Таким образом, эта категория земель должна учитываться при спутниковом мониторинге процессов опустынивания и оценке их экологических последствий.

Разделение подвижных песков и дефлированных территорий, лишённых растительного покрова в результате воздействия антропогенных нагрузок и неблагоприятных гидротермических условий, соров и приуроченных к ним гидроморфных солончаков, растительность на которых отсутствует в силу естественных причин, возможно на основе среднемноголетних значений водного индекса NDWI.

Работа выполнена в рамках темы Института космических исследований РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8) с использованием сервиса «Вега-Science» (Loupian et al., 2022) и инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

Литература

- 1. *Абатуров Б. Д.*, *Конюшкова М. В.* Постхвалынская динамика наземных экосистем на степной равнине Северного Прикаспия // Успехи современной биологии. 2020. Т. 140. № 5. С. 494—506. DOI: 10.31857/S0042132420050038.
- 2. *Барталев С.А.*, *Егоров В.А.*, *Жарко В.О. и др.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с. http://iki.cosmos.ru/books/2016bartalev.pdf.
- 3. *Берденгалиева А. Н.*, *Дорошенко В. В.* Пространственное распределение соровых понижений на юге европейской России по данным дистанционного зондирования // Научно-агроном. журн. 2022. № 4. С. 6—11. DOI: 10.34736/FNC.2022.119.4.001.06-11.
- 4. *Берденгалиева А. Н.*, *Шинкаренко С. С.*, *Выприцкий А. А.* Геоинформационное картографирование соровых понижений в Северо-Западном Прикаспии // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 359—367. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-359-367.

- 5. *Виноградов Б. В.* Исследование индикаторов при мониторинге опустынивания юга России // Аридные экосистемы. 1996. Т. 2. № 4. С. 38—54.
- 6. *Гасанов Г. Н.*, *Асадулаев З. М.*, *Асварова Т. А. и др*. Экологические аспекты формирования солончака реградированного в Терско-Кумской низменности Прикаспия // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14. № 4. С. 86–97. DOI: 10.18470/1992-1098-2019-4-86-97.
- 7. *Гасанова З. У.*, *Абдурашидова П. А. Джалалова М. И.* Экологические условия формирования галофитной растительности Кизлярского залива // Вестн. Дагестанского науч. центра. 2015. № 56. С. 14—19.
- 8. Дорошенко В. В. Геоинформационное картографирование соровых понижений и солончаков в Ставропольском крае // Изв. Нижневолжского агроуниверситет. комплекса: наука и высшее проф. образование. 2022. № 4(68). С. 553–561. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-04-64.
- 9. *Лазарева В. Г.*, *Бананова В. А.*, *Нгуен В. 3*. Картирование растительности Сарпинской низменности в пределах Республики Калмыкия методами дистанционного зондирования и ГИС // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 178—183.
- 10. *Лупян Е.А.*, *Прошин А.А.*, *Бурцев М.А. и др.* 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. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2015t5/263%E2%80%93284.pdf.
- 11. *Пишулов С.А.* Соры как форма аридного рельефа // Геоморфология. 2013. № 3. С. 89–96. DOI: 10.15356/0435-4281-2013-3.
- 12. *Рулев А. С.*, *Кошелева О. Ю.*, *Шинкаренко С. С.* Геоморфологические критерии проведения лесомелиорации ландшафтов (на примере Приэльтонья) // Геоморфология. 2017. № 2. С. 63—71. DOI: 10.15356/0435-4281-2017-2-63-71.
- 13. *Рыбашлыкова Л. П.*, *Беляев А. И.*, *Пугачёва А. М.* Мониторинг сукцессионных изменений пастбищных фитоценозов в «потухших» очагах дефляции Северо-Западного Прикаспия // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14. № 4. С. 78—85. DOI: 10.18470/1992-1098-2019-4-78-85.
- 14. *Стасюк Н.В.*, *Кравцова В.И.* Оценка изменений почвенного покрова Кизлярского побережья по разновременным картам и космическим снимкам // Аридные экосистемы. 2012. Т. 18. № 3(52). С. 86—94.
- 15. *Титкова Т. Б.*, *Золотокрылин А. Н.* Мониторинг подверженных опустыниванию земель Республики Калмыкия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 130–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141.
- 16. *Уланова С. С.* Геоинформационные системы при изучении экотонных территорий побережий водоемов Калмыкии // Вестн. Калмыцкого ин-та социально-эконом. и правовых исслед. 2004. Т. 1. № 1. С. 76–78.
- 17. Шинкаренко С. С. Пространственно-временная динамика опустынивания на Черных землях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 155—168. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-155-168.
- 18. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. (2020а) Последствия пыльных бурь 2020 года на юге европейской части России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 270—275.
- 19. *Шинкаренко С. С.*, *Барталев С. А.* (2020б) Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 179—194. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194.
- 20. *Шинкаренко С. С.*, *Барталев С. А.* Оценка площади опустынивания на юге европейской части России в 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 291–297. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-291-297.
- 21. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н., Выприцкий А. А. Динамика площадей водоемов Западного ильменно-бугрового района дельты Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 285—290. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290.
- 22. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Берденгалиева А. Н., Дорошенко В. В. Спутниковый мониторинг процессов опустынивания на юге европейской России в 2019—2022 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 319—327. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-319-327.
- 23. *Chen B.*, *Xu B.*, *Zhu Z. et al.* Stable classification with limited sample: Transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017 // Science Bull. 2019. V. 64. P. 370–373. DOI: 10.1016/j.scib.2019.03.002.
- 24. *Chen J.*, *Ban Y.*, *Li S.* China: Open access to Earth land-cover map // Nature. 2014. V. 514(7523). Article 434. DOI: 10.1038/514434c.

- 25. Gunin P. D. Danzhalova E. V., Bazha S. N. et al. NDVI for Monitoring of the State of Steppe and Desert Ecosystems of the Gobi // Arid Ecosystems. 2019. V. 9. No. 3. P. 179–186. DOI: 10.1134/S207909611903003X.
- 26. *Karra K.*, *Kontgis C.*, *Statman-Weil Z.* Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning // 2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2021. P. 4704–4707. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
- 27. *Kulik K. N.*, *Rulev A. S.*, *Yuferev V. G.* Geoinformation analysis of desertification dynamics in the territory of Astrakhan oblast // Arid Ecosystems. 2015. V. 5. No. 3. P. 134–141. DOI: 10.1134/S2079096115030087.
- 28. Kulik K. N., Petrov V. I., Yuferev V. G. et al. Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. No. 2. P. 98–105. DOI: 10.1134/S2079096120020080.
- 29. Loupian E.A., Bourtsev M.A., Proshin A.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.
- 30. *McFeeters S. K.* The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. No. 7. P. 1425–1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
- 31. *Shadrina M. B.*, *Bykov A. V.*, *Kolesnikova A. V.*, *Shabanova N. P.* Spatial functional organization of ecotones on shores of intermittent lake Bulukhta (North Caspian lowland) // Arid Ecosystems. 2013. V. 3. No. 4. P. 244–249. DOI: 10.1134/S2079096113040094.
- 32. Zanaga D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W. et al. ESA WorldCover 10 m 2020 v100. 2021. DOI: 10.5281/zenodo.5571936.
- 33. *Zolotokrylin A. N.*, *Titkova T. B.* A new approach to the monitoring of desertification centers // Arid Ecosystems. 2011. V. 1. No. 3. P. 125–140. DOI: 10.1134/S2079096111030127.
- 34. Zonn I. S., Kust G. S., Andreeva O. V. Desertification paradigm: 40 years of development and global efforts // Arid Ecosystems. 2017. V. 7. No. 3. P. 131–141. DOI: 10.1134/S2079096117030118.

Mapping of sor depressions and solonchaks in the Northern Caspian region based on long-term Landsat data

S. S. Shinkarenko¹, S. A. Bartalev^{1,2}

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru ² Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia

Sor depressions (sors) of various origins and hydromorphic solonchaks associated with them are characteristic objects of arid landscapes. In Russia, they are widespread in the southeast of the European part, as well as in the south of Western Siberia and in Transbaikalia. Sors are depressions, at the bottom of which the processes of solonchak formation are actively developing, often there are permanent or drying up salty and brackish water bodies. The surface of salt marshes is practically devoid of vegetation cover, only a few of the most resistant plant species are able to withstand such high levels of salinity. In recent years, in the southeast of the European part of Russia, desertification processes have intensified up to complete disappearance of vegetation and exposure of shifting sands and blowout basins due to droughts and excessive pasture loads. During satellite monitoring of these processes, open sands are often confused with sors and solonchaks, which are devoid of vegetation due to natural causes, and not due to the impact of adverse factors. For this reason, a technology is needed to separate open sands and deflated areas and natural formations — sors and solonchaks. The paper proposes a method for mapping sors based on the average annual values of NDVI and NDWI calculated from Landsat data that have undergone the atmospheric distortion correction procedure. Threshold values of these indices are proposed for separating sors from open sands and permanent reservoirs. As a result, the area of sor depressions and solonchaks amounted to about 245 thousand hectares, which exceeds the area of open sands and deflated territories before the period of intensification of desertification processes in 2019-2022.

Keywords: arid landscapes, remote sensing, sors, solonchaks, southern Russia, Landsat

Accepted: 28.08.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-153-165

References

- 1. Abaturov B. D., Konyushkova M. V., The Post-Khvalyn dynamics of the dry land ecosystemsat the steppe plain in the north of The Caspian Lowland, *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2020, Vol. 140, No. 5, pp. 494–506 (in Russian), DOI: 10.31857/S0042132420050038.
- 2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O. et al., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian), http://iki.cosmos.ru/books/2016bartalev.pdf.
- 3. Berdengalieva A. N., Doroshenko V. V., Spatial Distribution of Sor Depressions in the South of European Russia According to Remote Sensing Data, *Nauchno-agronomicheskii zhurnal*, 2022, No. 4, pp. 6–11 (in Russian), DOI: 10.34736/FNC.2022.119.4.001.06-11.
- 4. Berdengalieva A. N., Shinkarenko S. S., Vypritskii A. A., Geoinformation mapping of sor depression in the Northwestern Caspian, *InterKarto. InterGIS*, 2022, Vol. 28, Issue 1, pp. 359–367 (in Russian), DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-359-367.
- 5. Vinogradov B. V., Study of indicators for monitoring desertification in the South of Russia, *Aridnye ekosistemy*, 1996, Vol. 2, No. 4, pp. 38–54 (in Russian).
- 6. Gasanov G. N., Asadulaev Z. M., Asvarova T. A. et al., Ecological Aspects of the Formation of Regraded Solonchak in the Terek-Kuma Lowland of the Caspian., *South of Russia: ecology, development*, 2019, Vol. 14, No. 4, pp. 86–97 (in Russian), DOI: 10.18470/1992-1098-2019-4-86-97.
- 7. Gasanova Z. U., Abdurashidova P.A., Dzhalalova M. I., Ecological conditions for the formation of halophytic vegetation in the Kizlyar Bay, *Vestnik Dagestanskogo nauchnogo tsentra*, 2015, No. 56, pp. 14–19 (in Russian).
- 8. Doroshenko V. V., Geoinformation mapping of sorov depressions and salt marshes in The Stavropol territory, *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2022, No. 4(68), pp. 553–561 (in Russian), DOI: 10.32786/2071-9485-2022-04-64.
- 9. Lazareva V.G., Bananova V.A., Nguen V.Z., Mapping the vegetation of the plain of the Sarpinsky lowland (Kalmykia) using remote sensing and GIS, *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2017, No. 12, pp. 178–183 (in Russian).
- 10. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A. et al., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2015t5/263%E2%80%93284.pdf.
- 11. Pishchulov S. A., Sors: an example of arid landforms, *Geomorfologiya*, 2013, No. 3, pp. 89–96 (in Russian), DOI: 10.15356/0435-4281-2013-3.
- 12. Rulev A. S., Kosheleva O. Yu., Shinkarenko S. S., Geomorphological criteria in agroforestry: Lake Elton area (SE Russian Plain) case study, *Geomorfologiya*, 2017, No. 2, pp. 63–71 (in Russian), DOI: 10.15356/0435-4281-2017-2-63-71.
- 13. Rybashlykova L. P., Belyaev A. I., Pugacheva A. M., Monitoring Successional Changes in Pasture Phytocenoses in 'Exhausted' Areas of Deflation in the North-West Caspian Region, *South of Russia: ecology, development*, 2019, Vol. 14, No. 4, pp. 78–85 (in Russian), DOI: 10.18470/1992-1098-2019-4-78-85.
- 14. Stasyuk N. V., Kravtsova V. I., The assessment of the dynamics of the soil cover of The Kizljar coast by a time series of maps and satellite images, *Aridnye ekosistemy*, 2012, Vol. 18, No. 3(52), pp. 86–94 (in Russian).
- 15. Titkova T. B., Zolotokrylin A. N., Monitoring of lands affected by desertification in the Republic of Kalmykia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 130–141 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141
- 16. Ulanova S. S., Geoinformation systems in the study of ecotonic territories of the coasts of reservoirs of Kalmykia, *Vestnik Kalmytskogo instituta sotsial'no-ekonomicheskikh i pravovykh issledovanii*, 2004, Vol. 1, No. 1, pp. 76–78.
- 17. Shinkarenko S. S., Spatial-temporal dynamics of desertification in Black Lands, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 155–168 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-155-168.
- 18. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A. (2020a), Consequences of dust storms in the south of the European part of Russia in September October 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 270–275 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-270-275.

- 19. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A. (2020b), NDVI seasonal dynamics of the North Caspian pasture land-scapes according to MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 179–194 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194.
- 20. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Assessment of desertification area in the south of the European part of Russia in 2021, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 291–297 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-291-297.
- 21. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N., Vypritskii A. A., Dynamics of water bodies areas in the Western Ilmen Lake Region of the Volga Delta, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 285–290 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290.
- 22. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N., Doroshenko V. V., Satellite monitoring of desertification processes in the south of European Russia in 2019–2022, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 319–327 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-319-327.
- 23. Chen B., Xu B., Zhu Z. et al., Stable classification with limited sample: Transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017, *Science Bull.*, 2019, Vol. 64, pp. 370–373, DOI: 10.1016/j.scib.2019.03.002.
- 24. Chen J., Ban Y., Li S., China: Open access to Earth land-cover map, *Nature*, 2014, Vol. 514(7523), Article 434. DOI: 10.1038/514434c.
- 25. Gunin P. D., Danzhalova E. V., Bazha S. N. et al., NDVI for Monitoring of the State of Steppe and Desert Ecosystems of the Gobi, *Arid Ecosystems*, 2019, Vol. 9, No. 3, pp. 179–186, DOI: 10.1134/S207909611903003X.
- 26. Karra K., Kontgis C, Statman-Weil Z. et al., Global land use/land cover with Sentinel-2 and deep learning, 2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS), 2021, pp. 4704–4707, DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
- 27. Kulik K. N., Rulev A. S., Yuferev V. G., Geoinformation analysis of desertification dynamics in the territory of Astrakhan oblast, *Arid Ecosystems*, 2015, Vol. 5, No. 3, pp. 134–141, DOI: 10.1134/S2079096115030087.
- 28. Kulik K. N., Petrov V. I., Yuferev V. G., Tkachenko N. A., Shinkarenko S. S., Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian, *Arid Ecosystems*, 2020, Vol. 10, No. 2, pp. 98–105, DOI: 10.1134/S2079096120020080.
- 29. Loupian E.A., Bourtsev M.A., Proshin A.A. et al., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
- 30. McFeeters S. K., The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, No. 7, pp. 1425–1432, DOI: 10.1080/01431169608948714.
- 31. Shadrina M. B., Bykov A. V., Kolesnikova A. V., Shabanova N. P., Spatial functional organization of ecotones on shores of intermittent lake Bulukhta (North Caspian lowland), *Arid Ecosystems*, 2013, Vol. 3, No. 4, pp. 244–249, DOI: 10.1134/S2079096113040094.
- 32. Zanaga D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W. et al., *ESA WorldCover 10 m 2020 v100*, 2021, DOI: 10.5281/zenodo.5571936.
- 33. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., A new approach to the monitoring of desertification centers, *Arid Ecosystems*, 2011, Vol. 1, No. 3, pp. 125–140, DOI: 10.1134/S2079096111030127.
- 34. Zonn I. S., Kust G. S., Andreeva O. V., Desertification paradigm: 40 years of development and global efforts, *Arid Ecosystems*, 2017, Vol. 7, No. 3, pp. 131–141, DOI: 10.1134/S2079096117030118.