

АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ КОМФОРТНОСТИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

С. А. Епринцев, О. Е. Архипова

*Воронежский государственный университет, Россия
Институт аридных зон Южного научного центра РАН, Россия
Южный Федеральный университет, Россия*

Поступила в редакцию 8 мая 2018 г.

Аннотация: По данным дистанционного зондирования Земли, полученным со спутников Landsat-7 и Landsat-8 проведено комплексное экологическое зонирование урбанизированных территорий Воронежской области. Изучены предпосылки формирования различных зон экологической комфортности.

Ключевые слова: урбанизированная территория, экологическая комфортность, дистанционное зондирование Земли, объекты экологического риска, Воронежская область.

Abstract: According to the Earth remote sensing data obtained from the Landsat-7 and Landsat-8 satellites, a complex ecological zoning of the urbanized areas of the Voronezh region has been carried out. The prerequisites for the formation of various zones of environmental comfort have been studied.

Key words: urbanized area, environmental comfort, remote sensing of the Earth, objects of environmental risk, Voronezh region.

Экологическая безопасность современных российских городов вызывает повышенный интерес у исследователей и экологов-практиков [5, 7, 10, 11, 13, 15, 16]. Развитие индустриального общества и научно-технический прогресс существенно повышают качество жизни населения, при этом, влекут возрастание некоторых сопутствующих проблем, одна из которых – повышение уровня загрязнения окружающей среды [5, 7, 10, 11, 13, 15, 16]. Повышение уровней загрязнения окружающей среды многих урбанизированных территорий России и мира влечет появление экологически-обусловленных заболеваний населения. Данный факт повышает актуальность проведения постоянного мониторинга факторов, определяющих экологическую безопасность для населения [5, 7, 10, 11, 13, 15, 16].

Теоретические основы изучения данной проблемы обоснованы во многих классических трудах отечественных и зарубежных ученых по урбоэкологии, геохимии окружающей среды и медицинской географии – Н. С. Касимовым,

А. А. Келлером, Б. И. Кочуровым, С. М. Малхазовой, А. И. Перельманом, Б. Б. Прохоровым, А. Learmonth, E. Perle и другими. В частности, концепция риска, разработанная в трудах ведущих отечественных гигиенистов А. И. Потапова, Г. Г. Онищенко, С. М. Новикова, Ю. А. Рахманина, Б. А. Ревича, С. Л. Авалиани и других, исходит из того, что сочетание в окружающей среде потенциально-опасных химических веществ и других вредных экологических факторов создает угрозу здоровью человека [5, 11, 16].

Изучение факторов, определяющих экологическую безопасность урбанизированных территорий, предполагает исследования с большими массивами данных, их анализ и картографирование, что делает необходимым применение современных геоинформационных технологий.

Результаты дешифрирования космоснимков, а также данные статистической информации обобщены в среде ГИС «Экология городов Воронежской области», на базе которой разработана модель влияния экологического каркаса на интегральную величину экологической комфортности исследуемой территории.



Рис. 1. Схема ГИС «Экология городов Воронежской области»

Созданные цифровые карты территории Воронежской области обеспечивают высокоточную привязку, отбор и интеграцию всей поступающей и архивной информации; полноту информации для принятия решений; возможность моделирования различных процессов и явлений; автоматизированное решение задач, связанных с анализом особенностей исследуемой территории; возможность оперативного анализа ситуации в экстренных случаях.

ГИС «Экология городов Воронежской области» включает в себя иерархически соподчиненные разделы баз данных и средств тематического картографирования, которые отражают социально-экономическую, эколого-гигиеническую ситуацию и природно-ресурсный потенциал урбанизированных территорий Воронежской области (рис. 1).

Основой служат данные дистанционного зондирования Земли, полученные со спутников Landsat-7 и Landsat-8, а также официальная статистическая информация природоохранных ведомств и органов государственного управления.

Для изучения факторов, определяющих экологическую комфортность урбанизированных территорий Центральной России (на примере городов Воронежской области), создан архив многоканальных космических снимков спутников Landsat-7 и Landsat-8, полученных на портале Геологической службы США [18]. Содержание каталога представлено в таблице 1.

Для изучения временной динамики природного каркаса исследуемых территорий – для каждой территории получены космоснимки за 2 периода: 1999-2002 годы (1 период) и 2015-2016 годы (2 период) (таблица 1).

Снимки, полученные со спутников Landsat-7 и Landsat-8, предоставляются потребителю в виде архива, состоящего из набора файлов, соответствующих панхроматическому и мультиспектральным каналам съемки.

Каждый файл – это растровое изображение (в формате *.GeoTIFF), имеющее географическую привязку. Потребитель имеет возможность самостоятельно с помощью определенных программных средств их обрабатывать, в том числе создавать синтезированные изображения.

Обработка полученных космоснимков проведена в программном пакете ArcGIS 10.3. При помощи окна «Анализ изображений» (Image Analysis), поддерживающего анализ и использование изображения и растровых данных в ArcMap с коллекцией часто используемых возможностей, процессов отображения и инструментов измерения, произведен расчет значений *NDVI* для исследуемой территории.

Использование *NDVI* позволяет вычислить стандартизированный индекс, позволяющий создавать изображение, отображающее зелень (относительную биомассу). Этот индекс использует кон-

Содержание каталога космических снимков урбанизированных территорий Центральной России со спутников Landsat-7 и Landsat-8

Основные города на снимке	Дата съемки	Идентификатор снимка
Воронеж, Нововоронеж, Лиски, Старый Оскол, Елец	2001, август, 10	LE71760242001222KIS00
	2016, август, 16	LC81760242016240LGN00
Россошь, Павловск, Богучар, Бутурлиновка	2001, август, 3	LE71750252001215SGS00
	2016, август, 20	LC81750252016233LGN00
Борисоглебск, Балашов	2001, август, 12	LE71740242001224KIS00
	2016, август, 29	LC81740242016242LGN00

Таблица 2

Идентификация объектов урбанизированных территорий по индексу *NDVI*

Тип объекта	Отражение в красной области спектра	Отражение в инфракрасной области спектра	Значение <i>NDVI</i>
Густая растительность	0,1	0,5	0,7
Разряженная растительность	0,1	0,3	0,5
Открытая почва	0,25	0,3	0,025
Облака	0,25	0,25	0
Снег и лед	0,375	0,35	-0,05
Вода	0,02	0,01	-0,25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	0,3	0,1	-0,5

траст характеристик двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных – поглощения пигментом хлорофилла в красном канале и высокой отражательной способности растительного сырья в инфракрасном канале (*NIR*).

NDVI вычисляется по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра; *RED* – отражение в красной области спектра.

Согласно данной формуле, плотность растительности (*NDVI*) в определенной точке изображения равна разнице интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму их интенсивностей [6].

Расчет *NDVI* базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра (0,6-0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации

хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0,7-1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной. Отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять и анализировать растительные от прочих природных объектов. Использование же не простого отношения, а нормализованной разности между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений как различия в освещенности снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой и т.д. [6, 8, 12].

Для отображения индекса *NDVI* используется стандартизованная непрерывная градиентная или дискретная шкала, показывающая значения в диапазоне от -1 до 1 в % или в так называемой масш-

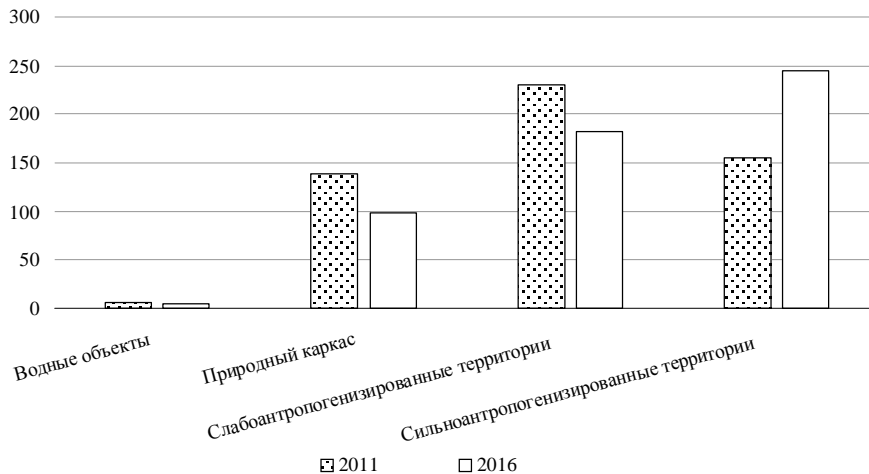


Рис. 2. Динамика распределение категорий, выделенных зонированием по методу *NDVI* территории города Павловска и пригородной десятикилометровой зоны

табированной шкале в диапазоне от 0 до 255 (используется для отображения в некоторых пакетах обработки ДЗЗ, соответствует количеству градаций серого), или в диапазоне 0..200 (-100..100), что более удобно, так как каждая единица соответствует 1% изменения показателя. Благодаря особенности отражения в *NIR-RED* областях спектра, природные объекты, не связанные с растительностью, имеют фиксированное значение *NDVI*, что позволяет использовать этот параметр для их идентификации (таблица 2).

Проведя классификацию пространственных объектов по методу *NDVI* космического снимка LE71760242001222KIS00 спутника Landsat-7, изучены пространственные соотношения внутригородских территорий, занятых гидрологическими объектами и зелеными насаждениями – остатки природного каркаса, слабо и сильно антропогенизированные площади по данным на 10 августа 2001 года в городской черте Воронежа, Лисок и Нововоронежа, а также в их 10-ти километровых буферных зонах. Для изучения динамики выделенных в 2001 году структур была проведена аналогичная классификация внутригородской территории Воронежа, Лисок и Нововоронежа, а также в их 10-ти километровых буферных зонах спустя 15 лет по космическому снимку LC881760242016240LGN00 спутника Landsat-8 от 16 августа 2016 года.

Проведение классификации пространственных объектов по методу *NDVI* городов Россошь и Павловск осуществлено по следующим космическим снимкам: 1) LE71750252001215SGS00 со спутника Landsat-7, сделанного 3 августа 2001 года; 2) LC81750252016233LGN00 со спутника Landsat-8, сделанного 20 августа 2016 года.

Проведя анализ территории города Павловск, являющегося одним из исторических центров России [2], установлено преобладание сильноантропогенизированной зоны в 2016 году (рис. 2).

Павловск с севера на юг пересекает автомагистраль федерального значения М-4 «Дон», разделяющая его на две неравные части: западную и восточную. В восточной части поселения расположены основные промышленно-коммунальные предприятия, массив современной индивидуальной усадебной застройки и земли сельскохозяйственного назначения. В западной части – кварталы жилой и общественной застройки, лесные массивы, простирающиеся вдоль Дона с севера на юг, пойменные территории р. Осередь и земли сельскохозяйственного назначения [2].

Следует отметить большой рост сильноантропогенизированной зоны за последние 15 лет. В период с 2001 по 2016 год она выросла в полтора раза (рис. 2). Существенные изменения наблюдаются в городской черте вдоль трассы М4-Дон. Слабоантропогенизированная площадь, наблюдаемая в 2001 году, преобразуется в сильноантропогенизированную в 2016 (рис. 2). Данный факт объясняется возрастающей ролью автомагистрали и увеличением автомобильного трафика на ней с начала XXI века, что обусловило активное развитие придорожной инфраструктуры, пик которого наблюдался на кануне и в период проведения зимних олимпийских игр в городе Сочи в начале 2014 года.

Кроме того, увеличение доли сильноантропогенизированной территории отмечается в пригородной зоне – месте расположения горнодобывающих объектов, что говорит о повышении актив-



Рис. 3. Динамика распределение категорий, выделенных зонированием по методу *NDVI* территории городского округа города Борисоглебска и пригородной десятикилометровой зоны

ности работы ОАО «Павловскгранит» за пятнадцатилетний период.

Лесные массивы, отнесенные к зоне природного каркаса в городе Павловске, и в десятикилометровой пригородной зоне сократились на 35 км², что составляет около 8 % от общей площади исследуемой территории (рис. 2). Данный факт, как и в городе Россошь, объясняется сильными пожарами летом 2010 года, приведшими к безвозвратной потере ценных рукотворных лесов.

Проведение классификации пространственных объектов по методу *NDVI* городского округа города Борисоглебска и пригородной десятикилометровой зоны осуществлено по следующим космическим снимкам: 1) LE7174024001224KIS00 спутника Landsat-7, сделанного 12 августа 2001 года; 2) LC81740242016242LGN00 спутника Landsat-8, сделанного 29 августа 2016 года.

Город Борисоглебск и 24 сельских населенных пункта составляют единое муниципальное образование – Борисоглебский городской округ [1]. Почти четверть территории округа (26 тыс. га) занимают леса, в том числе широколиственные леса – дубравы. Город Борисоглебск расположен в 230 километрах к востоку от Воронежа. Через город проходят автомагистрали Воронеж–Саратов, Москва–Волгоград, железная дорога Москва–Волгоград [1].

Анализируя пространственное зонирование территории городского округа города Борисоглебска и пригородной десятикилометровой зоны методом *NDVI*, следует отметить здесь наибольшую площадь зоны природного каркаса по сравнению с другими городами Воронежской области.

За пятнадцатилетний период в городе и его окрестностях произошли существенные увеличения (почти в 2 раза) территорий, относящихся к зоне природного каркаса. Данный факт объясняется грамотной экологической политикой муниципальных властей города – высадкой лесов в южной части города, ограничением доступа в леса для автотранспорта, а также жесткий контроль за пребыванием в лесных массивах населения.

Несмотря на потерю части лесного фонда летом 2010 года, общая площадь лесных массивов продолжила увеличиваться (рис. 3).

Анализируя розу ветров городского округа города Борисоглебска [1], имеющую круговую тенденцию (за исключением северного румба), можно заключить, что пространственное расположение природного каркаса вокруг городского округа города Борисоглебска оказывает существенное положительное влияние на микроклиматические условия и экологическую обстановку.

Площадь сильноантропогенизированных территорий в пределах городского округа города Борисоглебска, а также пригородной десятикилометровой зоны за пятнадцатилетний период увеличилась на 5 % от общей площади исследуемой территории (рис. 3), что является закономерностью для урбанизированных территорий развитых стран мира.

Площадь слабоантропогенизированной местности городского округа города Борисоглебска и пригородной десятикилометровой зоны за пятнадцатилетний период сократилась на 125 км² из-за того, что ее территория была занята зонами природного каркаса (рис. 3).

Динамика зоны водных объектов исследуемой территории находится в пределах погрешности методики.

Таким образом, пространственное зонирование городов Воронежской области и пригородных десятикилометровых зон методом *NDVI* показало некоторую дифференциацию изученных территорий по размерам зон природного каркаса от 13 до 30 %.

Наименьшие значения площади природного каркаса наблюдаются в областном центре – городском округе городе Воронеже. Такая ситуация объясняется рядом социально-экономических причин. Во-первых, цена земли, а также ее рентабельность как в самом Воронеже, так и в пригородных зонах существенно выше, чем в других изученных урбанизированных территориях, что подталкивает местные бизнес-элиты к освоению пригородных зон и сокращению лесных массивов и природных урочищ. Во-вторых генеральным планом городского округа города Воронеж предусмотрен вынос объектов экологического риска в пригородные зоны, что с одной стороны имеет положительный экологический эффект, а с другой, ведет к сокращению площадей природного каркаса.

Помимо площадей природных каркасов, важное значение имеет их расположение относительно городской черты. Приоритетней было бы расположение зон природного каркаса с наветренной стороны относительно города. На территории Воронежской области наилучшим образом по данному показателю можно назвать расположение природного каркаса вблизи городов Лиски и Борисоглебск.

На всех изученных урбанизированных пространствах и пригородных зонах наблюдается устойчивый рост сильноантропогенизированных территорий, что совпадает с тенденцией роста урбанизированных районов в развитых странах мира.

Исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ (проект 16-45-360284 р_а и 16-05-00940_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Администрация Борисоглебского городского округа Воронежской области. – URL: <http://adminborisoglebsk.ru/index.php?page=gorod>
2. Администрация города Павловска. – URL: <http://pavlovskadmin.ru/index.php/gradostroitelnoe-zonirovanie/>
3. Воробьева А. А. Дистанционное зондирование земли / А. А. Воробьева. – Санкт-Петербург : СПбУ ИТМО, 2012. – 168 с.
4. Воронежская область. Официальный портал органов власти. – URL: <http://www.govrn.ru>
5. Воронеж: среда обитания и зоны экологического риска / С. А. Куролап [и др.]. – Воронеж : Истоки, 2010. – 207 с.

6. Географические информационные системы и дистанционное зондирование. – URL: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>

7. Епринцев С. А. Оценка экологической комфортности населения урбанизированных территорий / С. А. Епринцев // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19, № 5. – С. 1410-1412.

8. Качалина Н. А. Оценка засоренности агрофитоценозов Ростовской области с использованием гиперспектральных данных дистанционного зондирования земли / Н. А. Качалина, А. В. Гречищев, О. Е. Архипова // Информация и Космос. – 2016. – № 1. – С. 17-34.

9. Кондратьев Д. Р. Использование технологий ДЗЗ на базе ситуационного центра Минприроды России в целях охраны окружающей среды / Д. Р. Кондратьев // Геоматика. – 2014. – № 4. – С. 40-46.

10. Куролап С. А. Экологическая экспертиза и оценка риска здоровью / С. А. Куролап, О. В. Клепиков, С. А. Епринцев. – Воронеж : Научная книга, 2012. – 108 с.

11. Медико-экологический атлас Воронежской области / под общ. ред. С. А. Куролапа, Н. П. Мамчика, О. В. Клепикова. – Воронеж : Истоки, 2010. – 166 с.

12. Оценка засоренности антропогенных фитоценозов на основе данных дистанционного зондирования Земли (на примере амброзии полыннолистной) / О. Е. Архипова [и др.] // Исследования Земли из космоса. – 2014. – № 6. – С. 15-26.

13. Пространственно-временной анализ встречаемости онкологических заболеваний как индикатора медико-экологической безопасности / О. Е. Архипова [и др.]. – Ростов-на-Дону : Издательство Южного научного центра РАН, 2014. – 224 с.

14. Чандра А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош. – Москва : Техносфера, 2008. – 312 с.

15. Экологическая безопасность населения урбанизированных территорий (на примере населенных пунктов Воронежской области) / С. А. Епринцев [и др.] // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18, вып. 5, ч. 3. – С. 2902-2904.

16. Эколого-географический атлас-книга Воронежской области / под ред. В. И. Федотова. – Воронеж : Издательство Воронежского государственного университета, 2013. – 512 с.

17. U.S. Geological Survey. – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov>

REFERENCES

1. Administratsiya Borisoglebskogo gorodskogo okruga Voronezhskoy oblasti. – URL: <http://adminborisoglebsk.ru/index.php?page=gorod>
2. Administratsiya goroda Pavlovsk. – URL: <http://pavlovskadmin.ru/index.php/gradostroitelnoe-zonirovanie/>
3. Vorob'yeva A. A. Distantionnoye zondirovaniye zemli / A. A. Vorob'yeva. – Sankt-Peterburg : SPbU ITMO, 2012. – 168 s.

4. Voronezhskaya oblast'. Ofitsial'nyy portal organov vlasti. – URL: <http://www.govvrn.ru>
5. Voronezh: sreda obitaniya i zony ekologicheskogo riska / S. A. Kurolap [i dr.]. – Voronezh : Istoki, 2010. – 207 s.
6. Geograficheskiye informatsionnyye sistemy i distantsionnoye zondirovaniye. – URL: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>
7. Eprintsev S. A. Otsenka ekologicheskoy komfortnosti naseleniya urbanizirovannykh territoriy / S. A. Eprintsev // Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser. Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki. – 2014. – T. 19, № 5. – S. 1410-1412.
8. Kachalina N. A. Otsenka zasorennosti agrofitotsenozov Rostovskoy oblasti s ispol'zovaniyem giperspektral'nykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli / N. A. Kachalina, A. V. Grechishchev, O. E. Arkhipova // Informatsiya i Kosmos. – 2016. – № 1. – S. 17-34.
9. Kondrat'yev D. R. Ispol'zovaniye tekhnologiy DZZ na baze situatsionnogo tsentra Minprirody Rossii v tselyakh okhrany okruzhayushchey sredy / D. R. Kondrat'yev // Geomatika. – 2014. – № 4. – S. 40-46.
10. Kurolap S. A. Ekologicheskaya ekspertiza i otsenka riska zdorov'yu / S. A. Kurolap, O. V. Klepikov, S. A. Eprintsev. – Voronezh : Nauchnaya kniga, 2012. – 108 s.
11. Mediko-ekologicheskiy atlas Voronezhskoy oblasti / pod obshch. red. S. A. Kurolapa, N. P. Mamchika, O. V. Klepikova. – Voronezh : Istoki, 2010. – 166 s.
12. Otsenka zasorennosti antropogennykh fitotsenozov na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (na primere ambrozii polynolistnoy) / O. E. Arkhipova [i dr.] // Issledovaniya Zemli iz kosmosa. – 2014. – № 6. – S. 15-26.
13. Prostranstvenno-vremennoy analiz vstrechayemosti onkologicheskikh zabolevaniy kak indikatora mediko-ekologicheskoy bezopasnosti / O. E. Arkhipova [i dr.]. – Rostov-na-Donu : Izdatel'stvo YUzhnogo nauchnogo tsentra RAN, 2014. – 224 s.
14. Chandra A. M. Distantsionnoye zondirovaniye i geograficheskiye informatsionnyye sistemy / A. M. Chandra, S. K. Gosh. – Moskva : Tekhnosfera, 2008. – 312 s.
15. Ekologicheskaya bezopasnost' naseleniya urbanizirovannykh territoriy (na primere naselennykh punktov Voronezhskoy oblasti) / S. A. Eprintsev [i dr.] // Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser. Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki. – 2013. – T. 18, vyp. 5, ch. 3. – S. 2902-2904.
16. Ekologo-geograficheskiy atlas-kniga Voronezhskoy oblasti /pod red. V. I. Fedotova. – Voronezh : Izdatel'stvo Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, 2013. – 512 s.
17. U.S. Geological Survey. – URL: <https://earthexplorer.usgs.gov>

Епринцев Сергей Александрович
кандидат географических наук, доцент кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. +7(473) 266-56-54, 8-950-755-21-05, E-mail: esa81@mail.ru

Архипова Ольга Евгеньевна
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института аридных зон Южного научного центра РАН, г. Ростов-на-Дону, т. (863)243-18-17, E-mail: arkhipova@ssc-ras.ru

Yeprintsev Sergey Alexandrovitch
Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of geocology and environmental monitoring, Faculty of Geography, Geocology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, tel. (473) 266-56-54, 8-950-755-21-05, E-mail: esa81@mail.ru

Arkhipova Ol'ga Yevgen'yevna
Candidate of Technical Sciences, leading researcher of the Institute of Arid Zones of the Southern scientific centre of RAS, Rostov-on-Don, tel. (863)243-18-17, E-mail: arkhipova@ssc-ras.ru