

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТОВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ НА НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ В ОРЕНБУРГСКОМ ЗАВОЛЖЬЕ

В.П. Петрищев¹, С.В. Багманова², К.В. Мячина³, Р.В. Ряхов⁴, А.А. Чибилев⁵

^{1, 3–5} Институт степи УрО РАН, отдел ландшафтной экологии

^{1, 2} Оренбургский государственный университет, кафедра геологии, геодезии и кадастра

² ООО «ВолгоУралНИПИгаз», отдел геологии и геофизики

¹ Вед. науч. с., зав. кафедрой, докт. геогр. н.; e-mail: wadpetr@mail.ru

² Доцент, зам. зав. отделом, канд. геол.-минерал. н.; e-mail: sbagmanova@rambler.ru

³ Вед. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: mavicsen@gmail.com

⁴ Мл. науч. с.; e-mail: remus.rv@gmail.com

⁵ Гл. науч. с., докт. геогр. н., академик РАН; e-mail: orensteppe@mail.ru

В работе рассматривается проблема трансформации структуры ландшафтов под воздействием техногенных факторов, связанных с добычей углеводородов на территории Оренбургской области. В качестве объектов исследования представлены техногеосистемы Росташинского и Зайкино-Зоринского месторождений. Основной целью исследования стало изучение динамики ландшафтных геосистем нефтегазовых месторождений с возможностью определить направление и величину деструктивных процессов. Для этого использовались методики расчета коэффициентов хронологического, типологического и энтропийного разнообразия ландшафтов на основе геоинформационного анализа разновременных данных дистанционного зондирования. Получены десять числовых показателей, отражающих структуру техногеосистем, и значения шести индексов ландшафтной дифференциации (энтропийной меры разнообразия и сложности Шеннона, неоднородности Ивашутиной-Николаева, Одума, Глисона-Маргалефа, Симпсона). По результатам проведенного анализа морфологической структуры техногеосистем Зайкинского и Росташинского месторождений определены ключевые факторы, оказывающие влияние на динамику ландшафтов: увеличение числа объектов, связанных с недропользованием, в связи с необходимостью поддерживать уровень объема добычи на староосвоенном месторождении; резкое повышение площади залежных земель с высокой фрагментарностью вследствие бурьянистых сукцессий; сокращение количества гидротехнических объектов (прудов) как объектов сельского хозяйства при увеличении площади технических водоемов, используемых нефтегазовой отраслью; сокращение площади лесных полос и рост контурности за счет сухостоя, закустаренности и самосева; появление заброшенных населенных пунктов и снижение численности населения, что ведет к увеличению количества контуров. Увеличение степени мозаичности техногенных ландшафтов нефтегазовых месторождений при очевидном снижении антропогенной нагрузки представляет собой восстановление нарушенных межкомпанентных и внутриландшафтных взаимодействий за счет включения положительных обратных связей при ослаблении внешних воздействий.

Ключевые слова: техногеосистемы нефтегазовых месторождений, ландшафтная структура, индексы ландшафтной дифференциации, данные дистанционного зондирования

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных проблем анализа структуры ландшафтных геосистем является объективная оценка динамики ее трансформации вследствие внешних и внутренних факторов. Изучение морфологической структуры ландшафтного комплекса возможно на основе полевой индикации естественных границ (как правило, на уровне фаций, урочищ и их типов) по элементам микро- и мезорельефа, по литологическому разнообразию, анализу растительных сообществ, подкрепляемому диагностикой почвообразующих процессов. При этом важной составляющей является корректировка полученных данных на основе картографического материала, который используется как в процессе экспедицион-

ных исследований, так и при последующих камеральных работах. При этом могут использоваться крупномасштабные топографические карты (в основном М 1:25000), ортофотопланы (М 1:10000) и специализированные тематические карты (геологическая, геоморфологическая, почвенная, геоботаническая, геохимическая и др.). Этапы подготовки к анализу синтетической схемы, иллюстрирующей морфологию ландшафта, растянуты во времени и ограничены в пространственном отношении. При этом такие построения представляют собой срезы состояния ландшафтной геосистемы на конкретную дату [Черных, 2011]. В связи с этим классификация территории на основе использования разновременных космических снимков представляет большее

удобство, так как не ограничена в пространстве и во времени. Степень объективности границ контуров и их группировка при классификации космических снимков достаточно спорна. Однако глубокое наземное изучение ведущих ландшафтообразующих факторов, а также использование фондовых картографических данных позволяют легко повысить объективность дистанционных методов исследования [Шехунова и др., 2015].

Основным объектом исследования работы являются ландшафтные комплексы, расположенные в пределах нефтегазовых месторождений. Они относятся к категории геосистем, в пределах которых техногенные объекты, несмотря на многочисленность, тем не менее занимают относительно небольшую площадь. В отличие, например, от глубоко измененных карьерно-отвалных комплексов с сильно нарушенной морфологической структурой, техноморфным рельефом, сукцессионными сообществами и широко развитыми техноземами, геосистемы, занятые инфраструктурой, связанной с добычей углеводородного сырья, имеют ландшафтные границы не разрушенные, а только измененные в результате недропользования [Бузмакова, 2003; Гареев, Шакиров, 2000; Глазьева, 2003]. В связи с этим исследования динамики структуры таких геосистем представляют интерес, так как дают возможность определить направление и степень деструктивных процессов [Jones, 2013; Plank, 2014].

Общая площадь разрабатываемых нефтяных месторождений в Оренбургской области составляет 5600 км², т. е. примерно $\frac{1}{10}$ часть территории районов западной части Оренбургской области занимают нефтегазовые ландшафты. Их особенностью являются сравнительно небольшие размеры и значительная территориальная разбросанность [Атлас мониторинга земель..., 2004; Геоэкологическое строение и нефтегазоносность..., 1997]. Из 97 эксплуатируемых нефтяных месторождений семь имеют площадь более 90 км², восемь – 50–90 км². Средняя площадь разрабатываемых месторождений составляет 25,6 км². Только три нефтегазовых месторождения имеют годовую добычу более 500 тыс. т – Сорочинско-Никольское, Росташинское, Бобровское, а на 15 объемы добычи нефти составляют от 100 до 500 тыс. т при среднем по области показателе 86 тыс. т. Средний срок разработки месторождений составляет 19 лет. 11 месторождений имеют срок разработки более 30 лет, в том числе Красноярское – 58 лет, Байтуганское – 57 лет. Средняя плотность скважин составляет 2,1 на 1 км². На четырех месторождениях она составляет более семи скважин на 1 км² (Самодуровское, Герасимовское, Сорочинско-Никольское, Курманаевское), а на девяти – от 5 до 7 на 1 км². Вследствие небольших

размеров и запасов месторождения углеводородного сырья в области вводились в эксплуатацию иногда значительно позднее своего открытия, поэтому обнаруживается их достаточно четкое территориальное распределение по времени начала добычи сырья. Происходит закономерное омоложение вводимых месторождений, а также нарастание запасов и контурных размеров осваиваемых залежей с северо-запада на юго-восток. Современный фонд эксплуатируемых месторождений на 17% состоит из залежей, добыча на которых начата в 1939–1969 гг., на 40% – в 1970–1979 гг., на 11% – в 1980–1989 гг., на 31% – в 1990–2000 гг. Характерное явление – снижение объемов и площадей загрязнения на тех месторождениях, которые вводились позднее.

Для проведения ландшафтно-морфологического анализа выбраны два месторождения Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна на территории Оренбургской области – Росташинское и Зайкинско-Зоринское. Они расположены в юго-западной части Бузулукской впадины в районе сочленения Волго-Уральской антеклизы с Прикаспийской синеклизой и приурочены к Зайкинско-Росташинской структурной зоне.

В физико-географическом отношении месторождения располагаются в пределах степной зоны Восточно-Европейской равнины. Ландшафтное районирование А.А. Чибилева [Географический атлас..., 1999; Чибилев, Дебело, 2006] позволяет его отнести к Общесыртовско-Предуральской возвышенной провинции, подзоне северной степи, Бузулук-Присамарскому сыртово-увалистому придолинно-плакорному району.

Ландшафтная структура Зайкинского месторождения сформирована преимущественно локальным водоразделом р. Грязнушки и бал. Долганки, являющихся правыми притоками р. Чаган и относящихся к бассейнам р. Урал и Каспийского моря. Водораздельные плакоры включают узкие плато, переходящие в гребни, расчлененные короткими и глубокими ресеквентными и обсеквентными оврагами и долами. Северные склоны в основном прямые пологие и покатые, южные – короткие и крутые, часто ступенчатые, с характерными уступами.

Росташинское месторождение занимает долину р. Башкирки и серию узких платообразных субмеридиональных водораздельных плакоров с прямыми и вогнутыми склонами, практически не изрезанными долинно-балочным типом местности. Только в юго-западной части месторождения располагается длинный и широкий склон, расчлененный протяженными долами.

Зайкинское месторождение является достаточно необычным как по условиям добычи, так и по добываемому углеводородному сырью. Месторожде-

ние введено в эксплуатацию в 1987 г. и относится к типу нефтегазоконденсатных. Оно отличается большой глубиной залегания продуктивных пластов, достигающей 4600 м, высоким начальным пластовым давлением (до 52 МПа), температурой пластов более 100°C, а также чрезвычайно большим содержанием растворенного газа в нефти в пластовых условиях (533–1172 м³/т). За весь период эксплуатации на месторождении добыто 16,2 млн т нефти. На 1 января 2015 г. запасы составляли 18,8 млн т. Степень выработанности – 46,9%.

Росташинское месторождение также введено в эксплуатацию в 1987 г. и относится к типу нефтяных месторождений. Однако его характеристики существенно отличаются от Зайкинского: за весь период эксплуатации на нем добыто 19,9 млн т нефти. На 1 января 2015 г. запасы составляли 16 млн т. Степень выработанности – 59,6%.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одними из способов изучения трансформации структуры ландшафта служат различные коэффициенты, оценивающие степень выраженности классов (ландшафтное разнообразие) и контурности или фрагментированности, мозаичности (сложность структуры ландшафта) [Walz, 2015; Kienast et al., 2015]. К ним относятся такие индексы хорологического, типологического и энтропийного разнообразия ландшафтной структуры, как энтропийные меры разнообразия и сложности Шеннона, неоднородности Ивашутиной – Николаева, Одума, Глизна – Маргалефа, Симпсона, учитывающие количество составляющих ландшафтного рисунка, степень контурности, площади урочища и ландшафтных контуров, их порядковую нумерацию [Викторов, 1986; Викторов, 1998; Ганзей, 2014]. В результате классификации космических снимков Landsat по состоянию территории на 1989 и 2018 гг. с использованием программ ENVI получена дифференциация территории на классы, контуры и группировки, численность и площадь которых определялись с использованием ГИС MapInfo.

При анализе морфологических особенностей техногеосистем использовались ранее построенные эколого-ландшафтные карты месторождений, основой для которых являлись как экспедиционные исследования, так и топографическая основа М 1:25000, карты почвенного обследования М 1:25000, а также ортофотопланы 2009 г. М 1:10000. Эколого-ландшафтные карты месторождений позволяют в целом определить особенности морфологической структуры их ландшафтов и являются основой для выявления степени устойчивости техногеосистем к воздействию процесса недропользования.

Для оценки геохимической устойчивости выбраны следующие критерии:

- гранулометрический состав почвообразующих пород определяет фильтрационные и сорбционные свойства. Чем больше крупность материала, тем выше фильтрация отложений. Чем тоньше состав, тем выше сорбционная способность;

- щелочно-кислотные и окислительно-восстановительные условия определяют различную степень миграции загрязняющих веществ по профилю почв;

- мощность органогенных горизонтов определяет величину сорбционной емкости этих горизонтов;

- содержание гумуса в верхних почвенных горизонтах определяет биогенную аккумуляцию токсинов.

При разработке эколого-ландшафтных карт месторождений проводилась их классификация по степени устойчивости. При этом под устойчивостью понимается способность компонентов ландшафта противостоять механическому и химическому воздействию. Устойчивость ландшафтных комплексов к загрязнению техногенными веществами определяется условиями разложения, рассеяния и удаления привнесенных в ландшафт веществ. Для оценки устойчивости природных комплексов были выбраны следующие критерии: тип ландшафта по условиям миграции веществ, состав почвообразующих отложений, щелочно-кислотные условия почв, содержание гумуса в почвенном профиле (табл. 1).

Для определения динамических особенностей изменения ландшафтной структуры в пределах месторождений и окружающих ландшафтов использовались данные дистанционного зондирования (ДДЗ), а именно снимки со спутников пятой и восьмой серий Landsat. Первым этапом проводился синтез пяти каналов ДДЗ по синему, зеленому, красному, ближнему и коротковолновому инфракрасному диапазонам. Выбор каналов обусловлен: спектральными свойствами растительности (интенсивностью поглощения/отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах), наличием видимого диапазона как фактора, влияющего на экспертную оценку при полевых исследованиях, и дополнен расширением инфракрасного спектра, с целью повышения контрастности изображения. Далее проводилась неконтролируемая классификация спутниковых изображений IsoDATA в программном комплексе ENVI. Количество классов установлено в промежутке от 1 до 25, повышение максимального значения вызывает сильную пикселизацию изображения, а минимального – снижает субъективность исследования. Число итераций равно 10, порог сходимости 5%.

Таблица 1

Соотношение геохимической устойчивости ландшафтных и почвенных таксонов

Степень геохимической устойчивости	Типы ландшафтов	Типы местности	Типы почв
Высокая	Трансэлювиальные, трансаккумулятивные	Склоны, увалы	Черноземы средне- и сильно-смытые, щебенчатые, солонцеватые, засоленные
	Эрозионные	Овраги, балки	Перемешанные смыто-намытые
Средняя	Элювиальные, трансэлювиальные	Сыртовые плато (водораздельные плакоры), придолинные террасы (надпойменные террасы и придолинные плакоры)	Зональные черноземы, в т.ч. карбонатные, лугово-черноземные
Низкая	Супераккумулятивные	Поймы, террасовые западины, заболоченные низины	Аллювиальные дерново-слоистые, дерново-луговые, лугово-болотные

По результатам ГИС-анализа получена статистическая база данных, отражающая пространственную структуру месторождений по временным срезам исследования. В ее состав входит информация о числе классов, количестве полигонов, суммарной и средней площади. На каждый период рассчитаны показате-

ли по территориям техногеосистем и окружающих их ландшафтов, не затронутых техногенным воздействием. Эти данные послужили основой для расчета коэффициентов, характеризующих ландшафтное разнообразие и сложность для техногеосистемы Зайкинского и Росташинского месторождений (табл. 2).

Таблица 2

Индексы ландшафтного разнообразия и сложности для техногеосистемы Зайкинского и Росташинского месторождений

Месторождение, год	Индекс					
	Разнообразия	Сложности	Неоднородности Ивашутиной – Николаева	Симсона – Одума	Глисона – Маргалефа	Симпсона
Зайкинское, 1989	–4,00	–3,98	0,97	0,29	5,77	0,94
Зайкинское, 2018	–3,53	–3,42	0,92	0,27	5,10	0,89
Росташинское, 1989	–3,96	–3,93	0,97	0,22	5,64	0,92
Росташинское, 2018	–3,87	–3,51	0,92	0,22	5,78	0,88

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Индекс энтропийной сложности и разнообразия Шеннона указывает на степень упорядоченности морфологии ландшафта. Чем выше данный показатель, тем более дробной является структура ландшафта, тем большим количеством контуров она формируется [Shannon, 1948]. Помимо этого, индекс Шеннона учитывает степень равномерности распределения контуров через оценку распределения площадей по каждому классу. Многоконтурность повышает устойчивость геосистемы к различным вызовам. Степень фрагментации гео-

системы может увеличиваться в результате приспособления к внешним природным факторам, выводящим ландшафтный комплекс из состояния равновесия. Такую же роль играют антропогенные процессы, активизация или стагнация которых способствует изменению контуров. Техногеосистема Зайкинского месторождения «пришла в движение» в первую очередь за счет восстановительной динамики залежных ровнядей (тип местности степи и лесостепи) [Мильков, 1977], которые затем через смену сукцессионных стадий приведут к климаксному состоянию структуры геосистемы в целом. Ведущую роль в формировании техногеосистемы

по-прежнему играет процесс недропользования. С учетом того, что Зайкинское месторождение введено в эксплуатацию в 1987 г., т. е. 32 года назад, процесс добычи неуклонно сопровождается нарастанием технологических объектов (плотность сетки скважин увеличилась со 140 до 238 скв./га). Этот рост, разумеется, также нашел свое отражение и в увеличении контурности геосистемы Зайкинского месторождения, но в большей степени в выравнивании классов, т. е. их равнодольности по площади. Также существенный рост фонда скважин произошел на Росташинском месторождении (с 18 добывающих скважин в 1989 г. до 30 добывающих и 9 нагнетательных в 2018 г. при неуклонном снижении объемов добычи с 456 до 125 тыс. т).

Индекс разнообразия Симпсона характеризует степень доминирования отдельных природно-территориальных комплексов (обычно в ранге урочищ или подурочищ) в составе ландшафта. За рассматриваемый период роль классов-доминантов в структуре геосистемы несколько снизилась, в первую очередь за счет снижения уровня распаханности территории [Шитиков и др., 2003]. Снижение относительно небольшое, преимущественно за счет того, что по-прежнему сохраняются границы сельскохозяйственных угодий и, соответственно, границы разновозрастных залежей. Следует подчеркнуть, что значение индекса Симпсона для Зайкинского и Росташинского месторождений снизилось в равных значениях, что совпадает с общей тенденцией для техногеосистем нефтегазовых месторождений Оренбургского Заволжья.

Индекс разнообразия Симпсона – Одума показывает, что техногеосистема Зайкинского месторождения относится к группе геосистем степной зоны с пониженным уровнем ландшафтного разнообразия. В целом ландшафт месторождения находится на грани деградации (при значении индекса 0,2) и загрязнения при активно происходящих антропогенных процессах. За 29 лет индекс снизился на 0,02. Данную величину можно назвать комплексным показателем изменения антропогенной нагрузки. Значение индекса для Росташинского месторождения существенно ниже и неизменно на протяжении 1989–2018 гг. В целом состояние техногеосистемы данного месторождения следует оценивать как более кризисное по сравнению с Зайкинским.

Индекс Глизона – Маргалефа отражает соотношение между контурностью и площадью территории. За исследуемый период значение индекса в пределах геосистемы Зайкинского месторождения существенно снизилось, а в пределах Росташинского, напротив, хоть и незначительно, но возросло.

Коэффициент ландшафтной неоднородности, предложенный Л.И. Ивашутиной и В.А. Николае-

вым [Ивашутина, Николаев, 1969], зависит от числа групп ландшафтов и соотносится с их площадями, т. е. если территорию занимает только один вид ландшафтов, то значение коэффициента равно нулю. Анализ морфологической структуры ландшафта Зайкинского нефтегазового месторождения в 1989 и 2018 гг. (рис. 1) показывает следующие основные закономерности: общее количество классов (типы урочищ, в том числе природно-агрогенные и техногенные) сократилось (с 24 до 22) при значительном росте контурности (фрагментированности) более чем на $\frac{1}{3}$ (35,1%); соответственно сократилась средняя площадь классов при возрастании числа контуров в каждом из них; степень упорядоченности структуры геосистем нефтегазовых месторождений существенно изменилась в течение 1989–2018 гг. за счет повышения дробности и в целом роста неупорядоченности (энтропии); сокращение количества классов (типов урочищ) в пределах техногеосистемы Зайкинского месторождения повлияло на показатель ландшафтной неоднородности в сторону ее сокращения.

Анализ морфологической структуры ландшафта Росташинского нефтегазового месторождения в 1989 и 2018 гг. (см. рис. 1) показывает следующие основные закономерности:

- общее количество классов (типов урочищ) осталось стабильным при существенном снижении контурности (более чем на 25%), т. е. сократилась степень дробности отдельных классов;

- рост неупорядоченности (энтропии) на месторождении противоречит общему снижению числа контуров, что свидетельствует о том, что в пределах отдельных классов произошло резкое снижение их количества, а в других – степень фрагментации практически не изменилась;

- сопоставимое количество классов и контуров при существенно различающейся площади техногеосистем Зайкинского и Росташинского месторождений показывает, что в сходных физико-географических условиях, сроках эксплуатации и объемах добычи динамика техногеосистем нефтегазовых месторождений различных размеров обуславливает сходные закономерности. Данное обстоятельство указывает на целостность и полимасштабность техногеосистем, сформированных в результате добычи углеводородного сырья [Хорошев, 2014].

Значение коэффициента H_i (абсолютная организация ландшафта) отражает степень выравнивания геосистемы – насколько максимально возможное ее разнообразие отличается от реального. Характерно, что для Зайкинского месторождения данный показатель в течение 1989–2018 гг. вырос, а для Росташинского – сократился вследствие различий в административном подходе к интенсивности

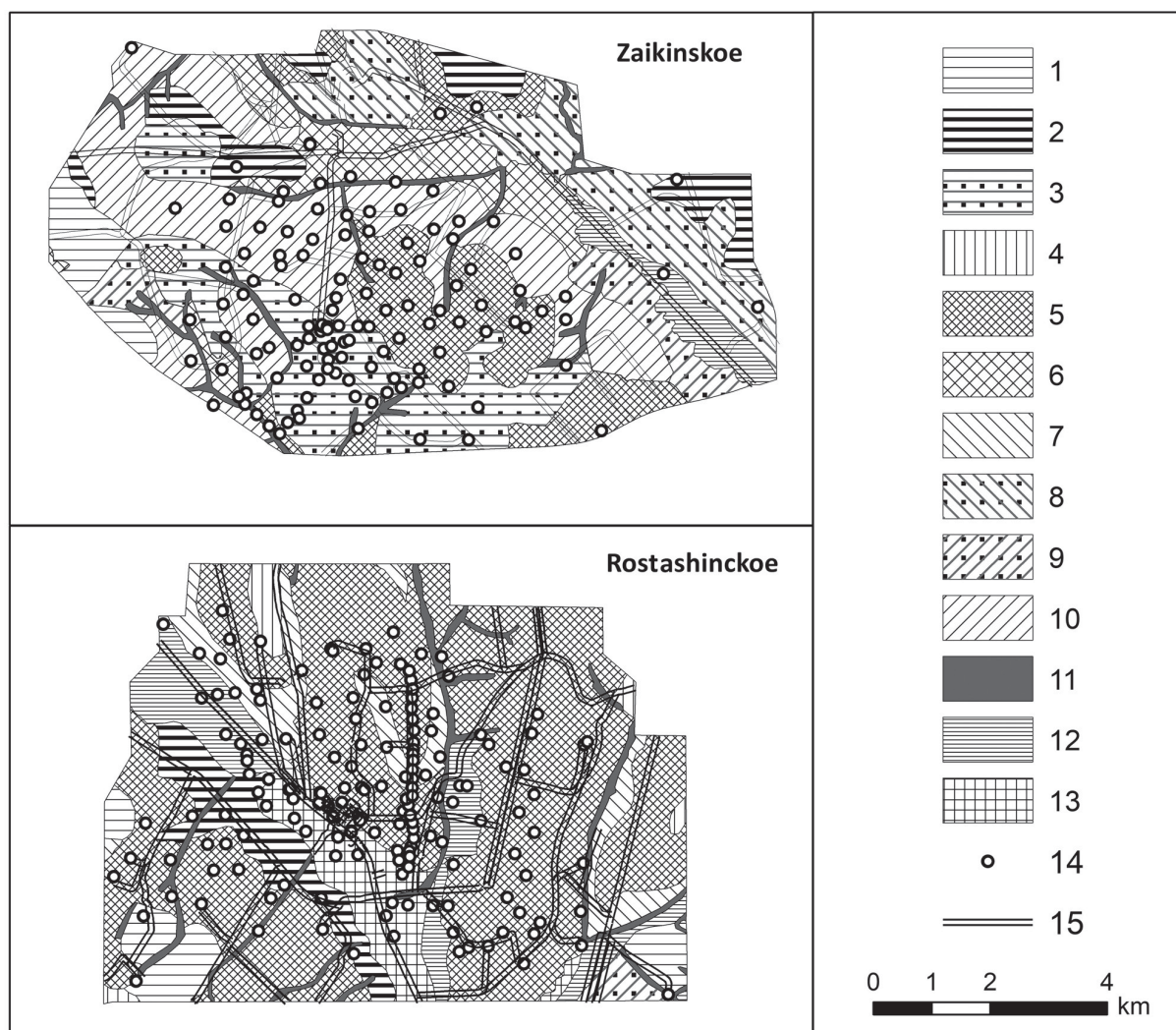


Рис. 1. Ландшафтная структура техногеосистем Зайкинского (А) и Росташинского (Б) нефтегазовых месторождений:

- 1 – водораздельные плато и пологие привершинные прямые склоны с черноземами южными маломощными, в том числе карбонатными; 2 – плакорные плато и пологие склоны с черноземами южными маломощными среднегумусными;
- 3 – водораздельные плато и пологие выпуклые склоны с солонцами мелкими и средними; 4 – вершины сыртовых увалов и покатые выпуклые склоны южной экспозиции с черноземами южными сильноэродированными; 5 – сильнопокатые и крутые склоны с черноземами южными сильноэродированными щебневатыми, в том числе карбонатными; 6 – покатые склоны водоразделов и увалов южной экспозиции с черноземно-солонцовыми комплексами среднеэродированными (25–50%); 7 – пологие склоны южной экспозиции с западинами с черноземами южными солонцеватыми маломощными и солонцами средними; 8 – пологие вогнутые склоны сыртовых увалов южной экспозиции с черноземно-солонцовыми комплексами и солонцами мелкими; 9 – пологие склоны водоразделов северной экспозиции с солонцами степными глубокими; 10 – пологие волнистые прямые склоны северной экспозиции с черноземами южными карбонатными слабоэродированными; 11 – овраги и балки со смыто-намытыми почвами;
- 12 – надпойменные террасы с солонцами луговыми мелкими; 13 – поймы и надпойменные террасы с комплексом лугово-черноземных почв и солонцов луговых мелких (25–50%); 14 – промышленные объекты; 15 – дорожная сеть

Fig. 1. Landscape structure of the techno-geosystems of the Zaikinsky (A) and Rostashinsky (B) oil and gas fields:
 1 – Watershed plateaus and near-to-summit gentle straight slopes with southern shallow chernozems, including carbonate; 2 – Plakor plateaus and gentle slopes with southern shallow humus chernozems; 3 – Watershed plateaus and gentle convex slopes with shallow and medium meadow solonchets; 4 – Summits of syrt ridges and sloping convex slopes of the southern exposure with heavily eroded southern chernozems; 5 – Strongly sloping and steep slopes with southern heavily eroded stony chernozems, including carbonate; 6 – Sloping slopes of watersheds and ridges of the southern exposure with moderately eroded (25–50%) chernozem-solonchets complexes; 7 – Gentle slopes of the southern exposure with depressions, with southern solonchetic shallow chernozems and medium solonchets; 8 – Gentle concave slopes of syrt ridges of the southern exposure with chernozem-solonchets complexes and shallow solonchets; 9 – Gentle slopes of north-oriented watersheds with deep steppe solonchets; 10 – Gentle undulating straight slopes of northern exposure with southern carbonate slightly eroded chernozems; 11 – Gullies and beams with eroded-and-drift soils; 12 – Floodplain terraces with shallow meadow solonchets; 13 – Floodplains and floodplain terraces with a complex of meadow chernozem soils and shallow meadow solonchets (25–50%); 14 – Industrial facilities; 15 – Road network

эксплуатационной нагрузки (Росташинское месторождение осваивается недропользователем более активно).

Анализ степени техногенной устойчивости ландшафтов в пределах техногеосистем Зайкинского и Росташинского месторождений показывает, что в целом при соблюдении закономерного снижения экологической емкости геосистем от элювиальных к аккумулятивным она корректируется местными факторами ландшафтной дифференциации – лито-

логическим составом, экспозицией склонов и особенностями микроклимата. На рисунке 2 отражено изменение степени устойчивости ландшафтов вдоль трех коммуникационных трасс, отходящих к югу от Оренбургского газоперерабатывающего комплекса. Трассы пересекают практически все элементы ландшафтной структуры Оренбургского Приуралья – водораздельные плакоры, сырцовые увалы и склоны, приречные террасы, поймы транзитных рек.

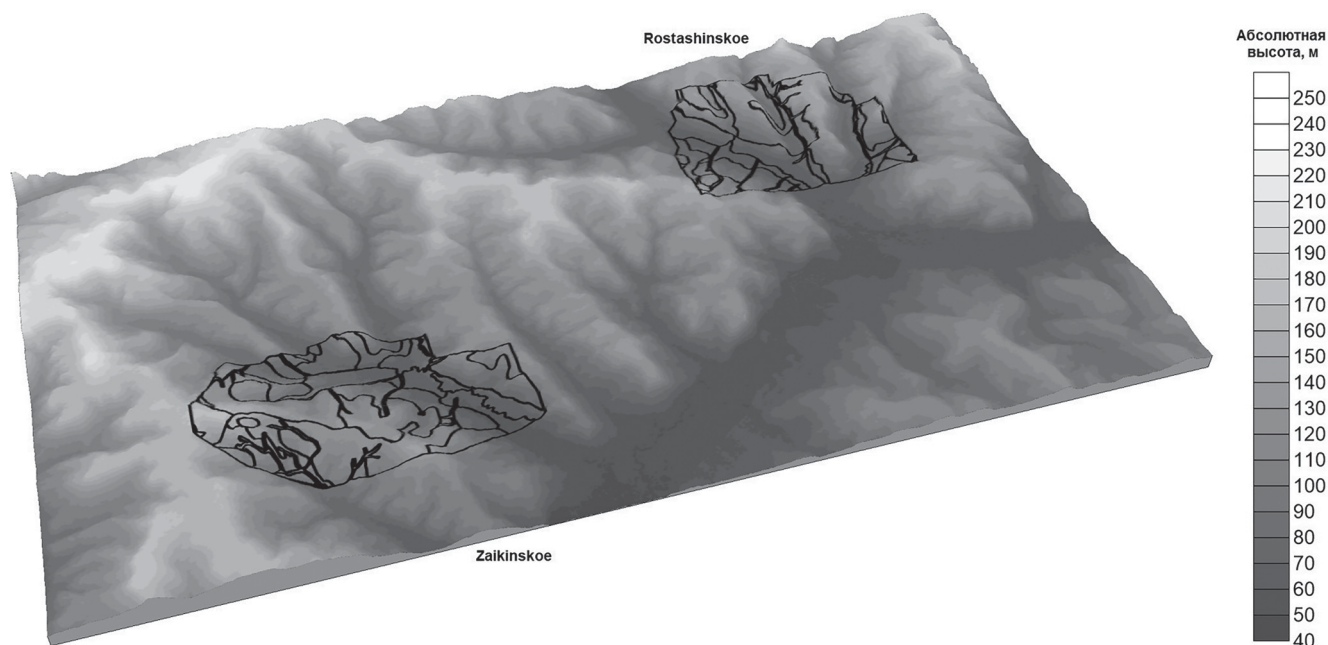


Рис. 2. Трехмерная модель расположения техногеосистем Зайкинского и Росташинского нефтегазовых месторождений

Fig. 2. Three-dimensional model of the location of technogeosystems of the Zaikinsky and Rostashinsky oil and gas fields

К числу наиболее геохимически устойчивых отнесены плакорные ландшафты приречных равнин и надпойменно-террасовые геокомплексы, отличающиеся лучшими дренажными условиями, высоким содержанием гумуса, преобладанием элювиальных и делювиальных процессов.

Менее устойчивыми являются ландшафты водораздельных плакоров, также имеющие благоприятные условия для фильтрации загрязняющих веществ, обладающие глинистым и тяжелосуглинистым мехсоставом почв. В отличие от вышеописанных геосистем в их формировании участвуют только элювиальные процессы, что снижает эффективность самоочищения ландшафтов.

Средняя экологическая емкость свойственна сырцово-холмистому и сырцово-увалистому типам местности, почвенный покров которых в основном состоит из карбонатных и неполноразвитых черноземов различной степени смывости, дефли-

рованности, каменистости и щебневатости, а также солонцеватости и комплексности. Несмотря на значительный уклон рельефа, в целом способствующий быстрой миграции загрязняющих веществ, низкая биопродуктивность и слабое развитие гумусового горизонта снижают защитные свойства таких ландшафтов. Близким уровнем экологической устойчивости обладают овражно-балочные геосистемы.

Наконец, для пойменных и бугристо-песчаных типов местности характерен самый низкий показатель устойчивости к нефтяному загрязнению. Первые из них суммируют загрязнение ландшафтов, расположенных выше в рельефе, и способны при условии попадания нефти в речные воды образовывать протяженные ореолы загрязнения. В условиях песчаных массивов бесструктурность литогенной основы почти полностью нивелирует миграцию поллютантов и способствует их накоплению.

Таким образом, при изучении техногенного воздействия на природную среду, оказываемого нефтяными месторождениями, необходимо учитывать не только особенности трансформации отдельных природных компонентов, но и изменение природных комплексов, сопровождающееся нарушением внутривидовых, внутрикомпонентных, межструктурных, межкомпонентных, а также парадинамических (парагенетических) взаимодействий [Марченко, 2000; Нефть и здоровье, 1993].

Общая оценка интенсивности химического загрязнения, проведенная по материалам ОренбургНИПИнефть по 91 нефтегазовому месторождению Оренбургской области [Атлас мониторинга земель..., 2004], показала, что интенсивность площади загрязнения распределяется крайне неравномерно в территориальном отношении. При этом количество месторождений, имеющих крайне неблагоприятную экологическую обстановку, составляет 25,3% (табл. 3) [Геоэкологическое строение

и нефтегазоносность..., 1997]. Среди таких месторождений Бобровское, Герасимовское, Курманевское, Султангулово-Заглядинское, Тананыкское, Самодуровское месторождения оказывают наиболее негативное воздействие как на отдельные природные компоненты, так и на ландшафтную среду в целом. Прослеживается следующая закономерность: небольшие по площади месторождения экологически безопаснее, чем сравнительно крупные. Соответственно, на крупных месторождениях степень трансформации природных геосистем глубже. Основные массивы загрязненных земель располагаются на наиболее крупных месторождениях: Бобровском, Сорочинско-Никольском, Тархановском, Султангуловском, Красноярском, Байтуганском. При этом сопряженность интенсивности загрязнения с плотностью скважин очень тесная (коэффициент корреляции Пирсона (r) составляет 0,72). Корреляция между площадью загрязнения и плотностью скважин $r = 0,35$.

Таблица 3

Распределение нефтегазовых месторождений Оренбургской области по интенсивности загрязнения

Интенсивность загрязнения	Слабая	Средняя	Сильная	Очень сильная
Количество месторождений	23	45	17	6
Доля месторождений по интенсивности загрязнения, %	25,3	49,4	18,7	6,6
Площадь месторождений, км ²	222,9	1140	618,6	302,5
Доля площади по интенсивности загрязнения, %	9,8	49,9	27,1	13,2

Одними из ведущих факторов, оказывающих непосредственное влияние на интенсивность загрязнения, являются плотность скважин ($r = 0,71$), длительность эксплуатации залежи ($r = 0,68$), объемы накопленной добычи нефти по отношению к площади месторождения ($r = 0,65$), объемы добываемого углеводородного сырья ($r = 0,41$).

Общая тенденция для геосистем нефтегазовых месторождений заключается в том, что их структура в советский период включала как объекты недропользования, так и систему сельскохозяйственного землепользования. При трансформации структуры экономики из системы природопользования в первую очередь стали выпадать сельскохозяйственные земли, что привело к формированию крупных массивов залежных земель, которые обладают высокой контурностью в результате сукцессионной динамики. Подобные залежные геосистемы широко охватили районы с нефтегазовыми месторождениями, поскольку деградация сельскохозяйственного производства происходила там быстрее за счет

интенсивного притока трудовых ресурсов в сферу недропользования и снижения востребованности сельскохозяйственной продукции.

ВЫВОДЫ

Анализ морфологической структуры техногеосистем Зайкинского и Росташинского месторождений показывает, что их динамика определяется следующими ключевыми факторами:

- увеличение числа объектов, связанных с недропользованием, в связи с необходимостью поддерживать уровень объема добычи на староосвоенном месторождении;
- резкое увеличение залежных земель с высокой мозаичностью вследствие бурьянистых сукцессий;
- сокращение количества гидротехнических объектов (прудов) как объектов животноводства при сохранении и даже увеличении площади технических водоемов, используемых нефтегазовой отраслью;
- сокращение площади лесных полос и рост контурности за счет сухостоя и закустаренности;

– появление заброшенных населенных пунктов и снижение численности населения в сохраняющихся, что также ведет к повышению контурности.

Увеличение степени фрагментированности техногенного ландшафта Зайкинского месторождения

при очевидном снижении антропогенной нагрузки представляет собой восстановление нарушенных межкомпонентных и внутриландшафтных взаимодействий за счет включения положительных обратных связей и ослабления внешних воздействий.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00122А (№ ЦИТиС АААА-А20-120011390069-6), а также в рамках бюджетной темы Института степи УРО РАН № ГР АААА-А21-121011190016-1 (Госзадание).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас мониторинга земель Оренбургской области. Оренбург: РФ ОАО «Оренбургское землеустроительное проектно-изыскательское предприятие», 2004. 60 с.
- Бузмаков С.А., Костарев С.М. Техногенные изменения компонентов природной среды в нефтедобывающих районах Пермской области. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2003. 171 с.
- Викторов А.С. Математическая морфология ландшафта. М.: Тратек, 1998. 180 с.
- Викторов А.С. Рисунок ландшафта. М.: Мысль, 1986. 179 с.
- Ганзей К.С. Оценка ландшафтного разнообразия вулканически активных островов // Известия РАН. Серия географическая. 2014. № 2. С. 61–70.
- Гареев А.М., Шакиров А.В. Природная среда и нефтегазовый комплекс Башкортостана. Географо-экологические аспекты взаимодействия. Уфа: Китап, 2000. 220 с.
- Географический атлас Оренбургской области / под ред. А.А. Чибилева. М.: Изд-во ДиК, 1999.
- Геоэкологическое строение и нефтегазоносность Оренбургской области / под ред. А.С. Пантелеева, Н.Ф. Козлова. Оренбург: Оренбургское кн. изд-во, 1997. 270 с.
- Глазьева А.Б. Геоэкологическая оценка влияния нефтегазового хозяйства на окружающую среду Воронежской области. Воронеж, 2003. 24 с.
- Ивашутина Л.И., Николаев В.А. К анализу ландшафтной структуры физико-географических регионов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1969. № 4. С. 49–59.
- Марченко А.В. Комплексный экологический мониторинг нефтяных месторождений. Ижевск: Удмуртский ун-т, 2000. 184 с.
- Милюков Ф.Н. Природные зоны СССР. М.: Мысль, 1977. 296 с.
- Нефть и здоровье. Ч. 2 / под ред. Л.М. Карамовой. Уфа: УфНИИ МТ и ЭЧ, 1993. 592 с.
- Хорошев А.В. Полимасштабность структуры географического ландшафта // Вопросы географии. 2014. № 138. С. 101–122.
- Черных Д.В. Количественная оценка сложности и разнообразия ландшафтного покрова Русского Алтая // Известия Алтайского гос. ун-та. 2011. № 3-2(71). С. 60–65.
- Чибилев А.А., Дебело П.В. Ландшафты Урало-Каспийского региона. Оренбург: Печатный дом «Димур», 2006. 264 с.
- Шехунова С.Б., Алексеенкова М.В., Стадниченко С.Н., Сюмар Н.П. Интегральная геологическая модель Солотвинской структуры как инструмент оценки геоэкологического состояния Солотвинского месторождения каменной соли // Сб. науч. тр. Института геологических наук НАН Украины. 2015. № 8. С. 233–250.
- Шутиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
- Jones N.F., Pejchar L. Comparing the Ecol. Impacts of Wind and Oil & Gas Development: A Landscape Scale Assessment, *PLOS ONE*, 2013, vol. 8, no. 11, DOI: 10.1371/journal.pone.0081391.
- Kienast F., Frick J., Strien van M.J., Hunziker M. The Swiss Landscape Monitoring Program – A comprehensive indicator set to measure landscape change, *Ecological modelling*, 2015, no. 295, p. 136–150.
- Plank S., Mager A., Schoepfer E. Monitoring of Oil Exploitation Infrastructure by Combining Unsupervised Pixel-Based Classification of Polarimetric SAR and Object-Based Image Analysis, *Remote Sensing*, 2014, no. 6(12), p. 11977–12004, DOI: 10.3390/rs61211977.
- Shannon C.E. The mathematical theory of communication, *Bell Syst. Techn. Journal*, 1948, vol. 27, p. 379–423.
- Walz U. Indicators to monitor the structural diversity of landscapes, *Ecological modelling*, 2015, no. 295, p. 88–106.

Поступила в редакцию 18.02.2020

После доработки 13.05.2021

Принята к публикации 02.06.2021

MORPHOLOGICAL STRUCTURE OF LANDSCAPES AT OIL AND GAS FIELDS IN THE ORENBURG TRANSVOLGA REGION

V.P. Petrishchev¹, S.V. Bagmanova², K.V. Myachina³, R.V. Ryakhov⁴, A.A. Chibilev⁵

^{1,3-5} *Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Department of Landscape Ecology*

^{1,2} *Orenburg State University, Department of Geology, Geodesy and Cadastre*

² *ООО "VolgoUralNIPGaz", Department of Geology and Geophysics*

¹ *Leading Scientific Researcher, Head of the Department, D.Sc. in Geography; e-mail: wadpetr@mail.ru*

² *Associate Professor, Deputy Head of the Department, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: sbagmanova@rambler.ru*

³ *Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: mavicsen@gmail.com*

⁴ *Junior Scientific Researcher; e-mail: remus.rv@gmail.com*

⁵ *Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geography, Academician of the Russian Academy of Sciences; e-mail: orensteppe@mail.ru*

The paper deals with the problem of landscape structure transformation under the influence of technogenic factors associated with the extraction of hydrocarbons within the territory of the Orenburg region. Technological systems of the Rostashinsky and Zaikinsko-Zorinsky deposits are chosen as objects of study. The main goal of the research was to study the dynamics of the geosystems of oil and gas fields in order to determine the direction and degree of destructive processes. For this purpose, the coefficients of horological, typological, and entropic diversity of landscapes were calculated using the geoinformation analysis of multi-temporal remote sensing data. As a result, ten numerical indices reflecting the structure of technogeosystems and six indices of landscape differentiation (Shannon entropy measure of diversity and complexity, heterogeneity of Ivashutina – Nikolaev, Odum, Glison – Margalef and Simpson) were obtained. Analysis of the morphological structure of the technogeosystem of the Zaikinsky and Rostashinsky fields showed that their dynamics is determined by the following key factors: increasing number of facilities related to subsoil use, due to the need to maintain the level of production at the old developed field; a sharp increase in the area of highly-mosaic fallow lands, due to weed successions; quantity reduction of agricultural hydrotechnical facilities (ponds), while maintaining and even increasing the area of technical reservoirs used by the oil and gas industry; reduction in the area of forest belts and increasing number of patches due to dead wood, shrubs and self-seeding; abandonment of settlements and decreasing population in the remaining ones, which also increases the number of contours. Higher degree of fragmentation of the technogenic landscapes of oil and gas fields, with an obvious decrease in the anthropogenic load, illustrates the restoration of disturbed inter-component and intra-landscape interactions due to positive feedbacks under weakening external influences.

Keywords: technogeosystems of oil and gas fields, landscape structure, indices of landscape differentiation, remote sensing data

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-05-00122A, No. TsITiS AAAA-A20-120011390069-6), and carried out under the budgetary theme of the Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences No. GR AAAA-A21-121011190016-1 (State assignment).

REFERENCES

- Atlas monitoringa zemel' Orenburgskoj oblasti* [Atlas of monitoring the lands of the Orenburg region], Orenburg, Russian Federation OJSC Orenburg Land Management Design and Survey Enterprise, 2004, 60 p. (In Russian)
- Buzmakov S.A., Kostarev S.M. *Tehnogennye izmeneniya komponentov prirodnoj sredy v nefteobrabatovyvayushih rajonah Permskoj oblasti* [Technogenic changes in the components of the environment in oil-producing regions of the Perm region], Perm, Publishing house Perm. un-ty, 2003, 171 p. (In Russian)
- Chernykh D.V. *Kolichestvennaya ocenka slozhnosti i raznobraziya landshaftnogo pokrova Russkogo Altaja* [Quantitative assessment of the complexity and diversity of the landscape cover of the Russian Altai], *Proceedings of the Altai State University*, 2011, no. 3-2(71), p. 60–65. (In Russian)
- Chibilev A.A., Debelo P.V. *Landshafty Uralo-Kaspijskogo regiona* [Landscapes of the Ural-Caspian region], Orenburg, Steppe Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Dimur Printing House, 2006, 264 p. (In Russian)
- Gareev A.M., Shakirov A.V. *Prirodnaja sreda i neftegazovyy kompleks Bashkortostana. Geograficheskie i ekologicheskie aspekty vzaimodejstviya* [The natural environment and the oil and gas complex of Bashkortostan. Geographic and environmental aspects of the interaction], Ufa, Kitap Publ., 2000, 220 p. (In Russian)
- Geograficheskij atlas Orenburgskoj oblasti* [Geographical Atlas of the Orenburg Region], A.A. Chibilev (ed.), Moscow, DiK Publ., 1999. (In Russian)
- Geoekologicheskoe stroenie i neftegazonosnost' Orenburgskoj oblasti* [Geoecological structure and oil and gas potential of the Orenburg region], A.S. Panteleeva, N.F. Kozlova (eds.), Orenburg, Orenburg Book Publishing House, 1997, 270 p. (In Russian)

- Glazyeva A.B. *Geojekologicheskaja ocenka vlijanija nef-tegazonosnogo hozjajstva na okruzhajushhuju sredu Voronezhskoj oblasti* [Geoecological assessment of the impact of the oil and gas industry on the environment of the Voronezh region], Voronezh, 2003, 24 p. (In Russian)
- Hansey K.S. Ocenka landshaftnogo raznoobrazija vulkanicheskij aktivnyh ostrovov [Assessment of the landscape diversity of volcanically active islands], *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 2014, no. 2, p. 61–70. (In Russian)
- Ivashutina L.I. Nikolaev V.A. K analizu landshaftnoj struktury fiziko-geograficheskij regionov [To the analysis of the landscape structure of physical and geographical regions], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geography*, 1969, no. 4, p. 49–59. (In Russian)
- Jones N.F., Pejchar L. Comparing the Ecol. Impacts of Wind and Oil & Gas Development: A Landscape Scale Assessment, *PLOS ONE*, 2013, vol. 8, no. 11, DOI: 10.1371/journal.pone.0081391.
- Khoroshev A.V. Polimasshtabnost' struktury geograficheskogo landshafta [The multiscale structure of the geographical landscape], *Questions of geography*, 2014, no. 138, p. 101–122. (In Russian)
- Kienast F., Frick J., Strien van M.J., Hunziker M. The Swiss Landscape Monitoring Program – A comprehensive indicator set to measure landscape change, *Ecological modelling*, 2015, no. 295, p. 136–150.
- Marchenko A.V. *Kompleksnyj ekologicheskij monitoring nefjanyh mestorozhdenij* [Integrated environmental monitoring of oil fields], Izhevsk, Udmurt un-ty Publ., 2000, 184 p. (In Russian)
- Milkov F.N. *Prirodnye zony SSSR* [Natural zones of the USSR], Moscow, Misl' Publ., 1977, 296 p. (In Russian)
- Neft' i zdorov'e. Chast' 2* [Oil and health, part 2], L.M. Karanova (ed.), Ufa, UfNII MT and EC Publ., 1993, 592 p. (In Russian)
- Plank S., Mager A., Schoepfer E. Monitoring of Oil Exploitation Infrastructure by Combining Unsupervised Pixel-Based Classification of Polarimetric SAR and Object-Based Image Analysis, *Remote Sensing*, 2014, no. 6(12), p. 11977–12004, DOI: 10.3390/rs61211977.
- Shannon C.E. The mathematical theory of communication, *Bell Syst. Techn. Journal*, 1948, vol. 27, p. 379–423.
- Shekhunova S.B., Aleksieienkova M.V., Stadnichenko S.M., Siumar N.P. Integralnaya geologicheskaya model Solotvinskoj struktury kak instrument otsenki geologicheskogo sostoyaniya Solotvinskogo mestorozhdeniya kamennoj soli [The integrated geological model of Solotvyno structure as a tool to assess geoecological sustainability of Solotvyno rock salt deposit], *Collection of scientific papers of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine*, 2015, no. 8, p. 233–250. (In Russian)
- Shitikov V.K., Rosenberg G.S., Zinchenko T.D. *Kolichestvennaja gidrojekologija: metody sistemnoj identifikacii* [Quantitative hydroecology: systems identification methods], Tolyatti, IEVB RAS Publ., 2003, 446 p. (In Russian)
- Viktorov A.S. *Matematicheskaja morfologija landshafta* [Mathematical morphology of the landscape], 1998, 180 p. (In Russian)
- Viktorov A.S. *Risunok landshafta* [Landscape pattern], Moscow, Misl' Publ., 1986, 179 p. (In Russian)
- Walz U. Indicators to monitor the structural diversity of landscapes, *Ecological modelling*, 2015, no. 295, p. 88–106.

Received 18.02.2020

Revised 13.05.2021

Accepted 02.06.2021