

УДК 504.062.2; 528.77; 502.084

Тип статьи: Обзорная

DOI: 10.17072/2410-8553-2021-1-102-127

Бузмаков Сергей Алексеевич

Пермский государственный
национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
ORCID ID: 0000-0002-5144-0714
e-mail: lep@psu.ru

Санников Павел Юрьевич

Пермский государственный
национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
ORCID ID: 0000-0001-7973-301X
e-mail: sol1430@gmail.com

Сивков Дмитрий Евгеньевич

Пермский государственный
национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
ORCID ID: 0000-0001-5583-4318
e-mail: sivkovd94de@gmail.com

Дзюба Екатерина Алексеевна

Пермский государственный
национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
ORCID ID: 0000-0002-6097-745X
e-mail: aea_eco@mail.com

Хотяновская Юлия Владимировна

Пермский государственный
национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
ORCID ID: 0000-0002-7172-778X
e-mail: 79082412863@yandex.ru

Егорова Дарья Олеговна

Пермский государственный
национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15
Институт экологии и генетики микроорганизмов –
филиал Пермского федерального исследовательского
центра УрО РАН,
614081, г. Пермь, ул. Голева, 13
ORCID ID: 0000-0001-8018-4687
e-mail: daryao@rambler.ru

Sergei A. Buzmakov

Perm State University
15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

Pavel Yu. Sannikov

Perm State University
15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

Dmitriy E. Sivkov

Perm State University
15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

Ekaterina A. Dziuba

Perm State University
15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

Yuliya V. Khotyanovskaya

Perm State University
15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia

Darya O. Egorova

Perm State University
15, Bukireva st., Perm, 614990, Russia
Institute of Ecology and Genetics of Microor-
ganisms, branch of the Perm Federal Research
Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences
13, Goleva st., Perm, 614081, Russia

РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ В РАЙОНАХ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Для рационального недропользования неотъемлемой частью стало состояние экологической защищенности природной среды от негативных процессов. В аналитическом обзоре изучена проблема создания геоинформационной системы для обеспечения экологической безопасности во время эксплуатации нефтяных месторождений на особо охраняемых природных территориях (ООПТ). Наполнение базы данных базируется на технологиях дистанционного зондирования территории проявления техногенных процессов, экспериментального моделирования ответной реакции биоты на воздействие техногенных факторов методами биотестирования. На основе цифровых технологий, применяемых для наблюдений, и геоинформационных систем, осуществляется оценка и разрабатываются поисковые и нормативные прогнозы, а также индивидуальные мероприятия по сохране-

нию и восстановлению природной среды. Нагрузки на природную среду обычно обусловлены галогенезом, битумизацией, атмосферным загрязнением и механогенезом. Использование геоинформационных систем для сбора данных о состоянии окружающей природной среды – существенная часть рационального недропользования. Мультиспектральная и панхроматическая аэрофотосъемка при помощи беспилотного летательного аппарата (БПЛА) успешно применяется для оценки загрязнения, деградации земель и эффективности их восстановления. Представляется важной отработка методики дистанционного зондирования с использованием БПЛА в районах размещения нефтяных месторождений и ценных природных объектов. Биотестирование последствий техногенной трансформации компонентов экосистем существенно связано с выбором оптимальных тест-объектов для проведения экспериментов. Загрязнение почв нефтью и продуктами ее переработки сказывается на состоянии растений и микроорганизмов. Целесообразна разработка методики для определения закономерностей и уровней воздействия остаточной нефти и техногенных рассолов на локальные природные объекты, местные почвенные и водные экосистемы по результатам биотестирования. Разработка регламентов типовых мероприятий по ремедиации экосистем при различных уровнях загрязнения, битумизации, галогенеза земель и водных объектов. Существуют технологические возможности для создания ГИС по контролю за качеством природной среды и экологической безопасности в районах нефтяных месторождений. Цифровые карты почв, водосборных бассейнов, природно-технических систем, развития техногенных процессов, мероприятий по восстановлению природной среды позволяют проводить пространственное моделирование природно-техногенных процессов. Управление качеством окружающей среды, при добыче углеводородов, остается существенной целью геоэкологических исследований.

Ключевые слова: рациональное недропользование, экологическая безопасность, геоинформационные системы (ГИС), беспилотный летательный аппарат (БПЛА), биотестирование, нефтяное месторождение, особо охраняемые природные территории (ООПТ).

DEVELOPMENT OF GEOINFORMATION SYSTEMS FOR ENVIRONMENTAL MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL SAFETY IN THE AREAS OF EXPLOITED OIL DEPOSITS

The state of environmental protection of natural environment from negative processes has become an integral part of sustainable mining. The analytical review shows the ways of geoinformation system's preparing a to ensure environmental safety during oil mining process on protected areas. Obtainment information for geoinformation database is based on technologies of aerial remote sensing, experimental modeling of biotic reactions to the impact of technogenic factors by biotesting methods. The geoinformation system should perform observations, assessments, search and regulatory forecasts, based on digital technologies, and develop individual measures for the preservation and restoration of the natural environment. Environmental stresses are usually caused by halogenesis, bitumization, air pollution and mechano-genesis. The use of geoinformation systems to collect information about the state of the natural environment is an essential feature of sustainable mining. Multispectral and panchromatic aerial photography by unmanned aerial vehicle has been successfully used to assess pollution, land degradation, and the effectiveness of land restoration. It is important to develop an unmanned aerial sensing technique for areas, where oil fields and protected are located. Biotesting of the consequences of technogenic transformation of ecosystem components is significantly related to the choice of optimal test objects for conducting experiments. Soil contamination with oil and its processed products affects the condition of all components: plants, microorganisms. It is advisable to develop a methodology for determining the patterns and levels of impact of residual oil and technogenic brines on local natural objects, local soil and water ecosystems based on the results of biotesting. Development of regulations for standard measures for remediation of ecosystems at different levels of pollution, during bitumization, halogenesis of land and water objects.

The review shows that there are technological possibilities for creating GIS for monitoring the quality of the natural environment and environmental safety in the areas of oil fields. Digital maps of soils, watersheds, natural and technical systems, the development of technogenic processes and measures to restore the natural environment, allow to provide spatial modeling of natural and technogenic processes. Environmental quality management during oil mining process remains an important goal of geoecological researches.

Keywords: sustainable mining, environmental safety, geographic information systems (GIS), unmanned aerial vehicles (UAV), biotesting, oil deposit, protected areas.

Введение

Разработка эффективной ГИС-модели для управления качеством окружающей среды при добыче углеводородов остается существенной целью геоэкологических исследований.

Создание геоинформационной системы управления качеством окружающей среды для обеспечения безопасности природных объектов при нефтедобыче позволяет развивать технологии геоэкологического мониторинга на основе цифровых технологий наблю-

дения, оценки, поисковых и нормативных прогнозов, разработке индивидуальных мероприятий по сохранению и восстановлению природной среды, что открывает возможности для использования технологии IoT. Цифровизация позволяет поднять на новую ступень ноосферосовместимости технологии обеспечения экологической безопасности при добыче углеводородов.

Например, в Пермском крае сеть охраняемых территорий включает 361 объект федерального, регио-

нального и местного значения. Их общая площадь достигает 10,7% от территории Пермского края. Основная часть площади приходится на ООПТ регионального значения. Их 257, и они занимают 8,8% территории Пермского края. Практически половину составляют охраняемые ландшафты (4,5%), весьма значительна доля биологических заказников. Добыча нефти проводится в границах ряда ООПТ: охраняемые ландшафты «Нижневишерский», «Куединский», «Сарашевские дубравы», «Малиновый хутор», «Большеситовское болото», заказники «Березниковский», «Большеусинский», «Октябрьский», «Соликамский», «Гулвинский», «Уинский». Разрабатываемые месторождения нефти Шершнёвское Логовское, Озёрное, Маговское, Гагаринское, Аспинское, Асюльское, Кирилловское, Чураковское, Уньвинское, Чашкинское, Юрчукское, Бельское, Ростовицкое, Проворовское, Жилинское, Южно-Юрчукское находятся на особо охраняемых природных территориях.

Повышение уровня экологической безопасности способствует устойчивому недропользованию в районах с уязвимой природной средой.

Настоящий обзор предназначен для выявления основных теоретических подходов, методик, технологий при разработке геоинформационных систем для контроля качества окружающей среды, обеспечивающих экологическую безопасность в районах эксплуатируемых нефтяных месторождений. Основными теоретическими положениями и методической основой достижения поставленной цели следует считать теорию техногенеза и техногенной трансформации природной среды; возможности дистанционного зондирования района месторождений с помощью беспилотного летательного аппарата и дешифрирования полученных данных; моделировании техногенных процессов методами биотестирования для определения количественных критериев экологической оценки; достаточности программ ГИС-моделирования для оценки, прогноза геоэкологической обстановки; возможности построить единый комплекс геоэкологических методик от полевых наблюдений и лабораторных экспериментов, до регламентов и карт с предлагаемыми мероприятиями по восстановлению природной среды.

Основная часть

Техногенез. Добыча нефти сопровождается поступлением в ландшафты органических и минеральных веществ природного и техногенного происхождения [45]. Нагрузки на природную среду обычно обусловлены геохимическими (галоге́нез, битумизация, атмосферное загрязнение) и физическими (механо́генез) воздействиями, возникающими при авариях на технических объектах, а также связанными с технологическими выбросами.

Битумизация – это один из основных видов геохимического воздействия на нефтепромысловых территориях [11, 36, 46]. Под битумизацией понимается загрязнение почвенного покрова и грунтов, воды,

донных осадков веществами органического происхождения.

Нефтепродукты, попадая в почву с определенными кислотно-щелочными условиями и свойствами, нарушают течение естественных природных процессов, что приводит к радикальным изменениям почвенных показателей и характеристик [42].

Особенности поведения и превращения углеводородов техногенного происхождения в почвенной толще весьма разнообразны и специфичны для тех или иных условий среды, поэтому их характеристика обладает высоким информативным потенциалом с точки зрения понимания и оценки происходящих в почве процессов [43].

Органическое загрязнение гидросферы – явление довольно распространенное в районах нефтедобычи и связано как с аварийными утечками из поверхностных нефтепромысловых объектов, так и с глубинными источниками (перетоки пластовых флюидов из продуктивной части разреза по затрубному пространству дефектных скважин или зонам повышенной проницаемости осадочного чехла) [6].

В качестве основного показателя уровня органического загрязнения гидросферы регламентировано определение водорастворенных «нефтепродуктов». Под этим термином понимают сумму неполярных и малополярных соединений, растворимых в неполярных растворителях [8, 14]. По своей сущности, нефтепродукты – это интегральный показатель, отражающий суммарное содержание экстрагируемых из воды углеводородов вне зависимости от их генезиса («углеводородный индекс»).

Однако применяемый в экологической практике нормативный показатель «нефтепродукты» не позволяет оценить реальные масштабы техногенной нагрузки и возможные источники загрязнения [5, 6]. Альтернатива нефтепродуктам, которые как интегральный индикатор нефтяного загрязнения не соответствуют современным экологическим требованиям – геохимические маркеры аквабитумоидов (АБ) нафтидного типа [33].

Выявлены закономерности техногенной трансформации нефтепродуктов в водных экосистемах [25].

Модели процесса самоочищения и формирования потенциала устойчивости экосистем, разработанные на примере участков, пострадавших в результате разлива нефти и мазута с известным химическим составом [24, 26], планируется адаптировать под экосистемы, испытывающие хроническое нефтяное загрязнение различного происхождения.

Техногенный гало́генез – засоление почв, грунтов, поверхностных, внутрпочвенных и подземных вод – наиболее характерный геохимический процесс преобразования природных систем в районах добычи нефти [45].

Один из геоэкологических факторов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду

при добыче нефти – техногенное засоление почв [44, 45].

При определении хлоридов и сульфатов в нефтезагрязненных почвах была выявлена прямая зависимость их содержания от концентрации нефтепродуктов в профиле почв. Следовательно, характер засоления напрямую зависит от количества и свойств нефти, поступившей в ландшафт при разливе [44].

Своеобразный солевой и микроэлементный состав пластовых вод, резко нарушает состояние экосистем, часто приводя к их полной деградации. Интенсивность воздействия минерализованных вод на геохимическое состояние и состояние природных комплексов часто более значительна по сравнению с нарушениями, вызванными только нефтяным загрязнением [34, 46].

Хлориды относятся к наиболее подвижным компонентам техногенных потоков в районах нефтедобычи [45]. Они интенсивно мигрируют с грунтовым стоком, что при интенсивном загрязнении может приводить к гидрохимическим аномалиям [30]. Иногда соленые подземные воды попадают прямо в реки и озера, в частности, выявлены многочисленные случаи фонтанирования старых геологоразведочных скважин, расположенных на приречных террасах [39, 40]. Выявлена зависимость между показателями солевого состава речных вод и уровнем техногенной нагрузки в пределах месторождения [4].

Воздействие токсичных пластовых вод приводит к морфологическим изменениям и трансформации структуры фитоценозов. Происходит обеднение видового разнообразия, снижение поглощенного растениями числа элементов [19].

При сильном засолении в растительном покрове появляются галофитные виды растений, в том числе несвойственные для района исследований, которые при доминировании формируют новые растительные сообщества взамен исходных [18].

Анализ содержания хлоридов в поверхностных водах может быть использован для оценки экологической ситуации на нефтяных месторождениях, следовательно, и для принятия управленческих решений, регулирующих природопользование [29].

Самые многочисленные источники загрязнения на промыслах – это факельные установки по сжиганию попутного нефтяного газа. Кроме того, выбросы продуктов сжигания углеводородов происходят из амбаров, через выхлопные и дымовые трубы. Углеводороды поступают в атмосферу при продувках скважин, стравливании из трубопроводов, при утечках из негерметичных технологических установок, испарении из очистных сооружений и резервуаров товарных парков [35].

Надежный показатель состояния атмосферы в зимний период – атмосферные выпадения, которые фиксируются в снежном покрове. При растоплении

снега эти выпадения переходят в снеговую воду, состав которой отражает состав аэрозолей атмосферы [35].

По данным Д.В.Московченко [30] под факельными установками в воздухе происходит увеличение содержания диоксида азота и сажи в 2 раза, оксида углерода и метана – в 1,3 раза. На участках с разведочными и добывающими скважинами количество сажи по сравнению с фоном увеличивается в 2 раза, диоксида азота – в 1,5 раза, диоксида серы и азота – в 1,3 раза.

Анализ результатов измерений показывает, что основные источники загрязнения воздушной среды расположены на площадках крупных технологических объектов – установки первичной подготовки нефти (УППН), пунктов сбора и сепарации нефти (НГСП) [48].

Механические воздействия на почвы и грунты приводят к нарушению равновесия в природных системах и появлению разнообразных вторичных техногенных процессов в ландшафтах.

Механические нарушения почвенного покрова и растительности, помимо сокращения природных ресурсов и нарушения естественных связей в экосистемах, естественного речного стока, вызывают усиление природных процессов, увеличивающих скорость дальнейшей деградации окружающей среды — криогенеза, эрозии и дефляции [35].

Экологические последствия механогенеза разнообразны и зависят от типа воздействий, например, из-за изъятия грунтовых масс (карьеры) или привноса веществ в ландшафты при строительстве линейных сооружений, отсыпке буровых площадок и др.

Наиболее интенсивный поверхностный и подземный механогенез осуществляется при строительстве и обустройстве промыслов. Однако заметные механические нарушения ландшафтов возникают и ранее, еще при поисках и разведке месторождений и позже, при их эксплуатации [45].

На любых этапах работы промыслов в процессе механогенеза формируются новые техногенные формы рельефа: 1) положительные, представленные разнообразными валами, насыпями, отвалами разнообразных грунтов; 2) отрицательные, связанные с земляными амбарами, карьерами, траншеями и т.д.

Интенсивные экологические изменения в ландшафтах возникают из-за подземного механогенеза при бурении, эксплуатации и ремонте скважин, закачивании жидкостей для поддержания пластового давления и интенсификации воздействия на продуктивные горизонты. Экологические ответы многообразны и проявляются как в изменениях геологической среды, так и в характере ландшафтообразующих процессов [45].

По результатам рассмотрения основных положений техногенеза при нефтедобыче составлена схема основных процессов (рис. 1 / fig. 1).

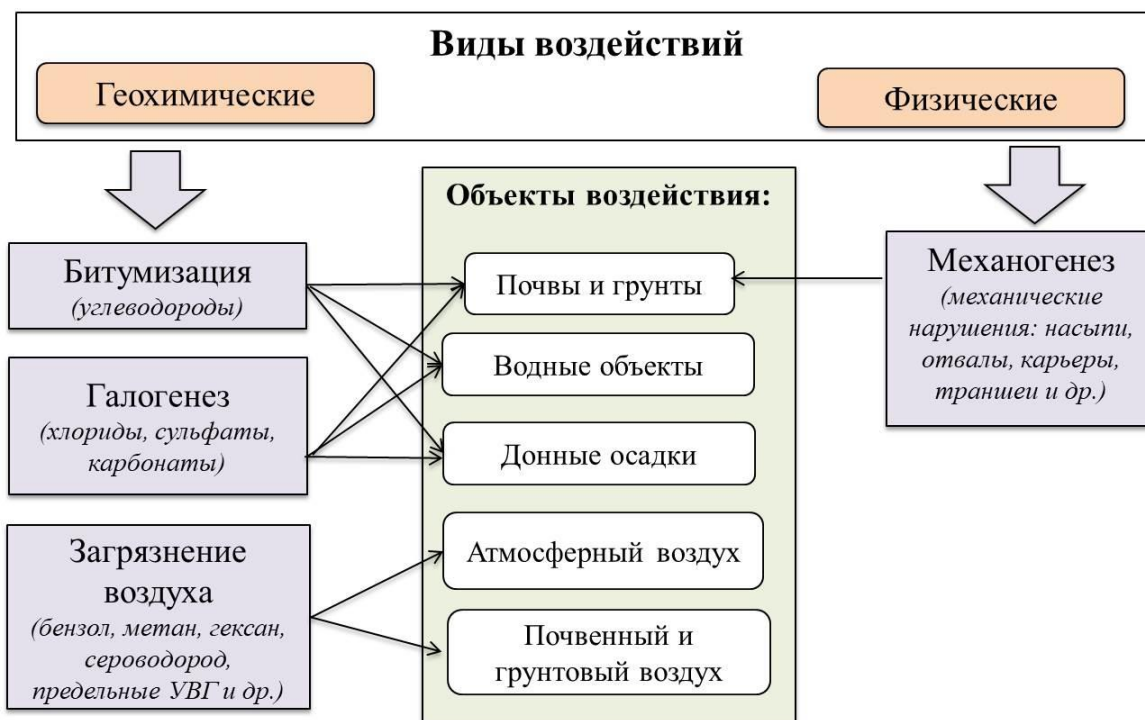


Рис. 1. Техногенез нефтяных месторождений

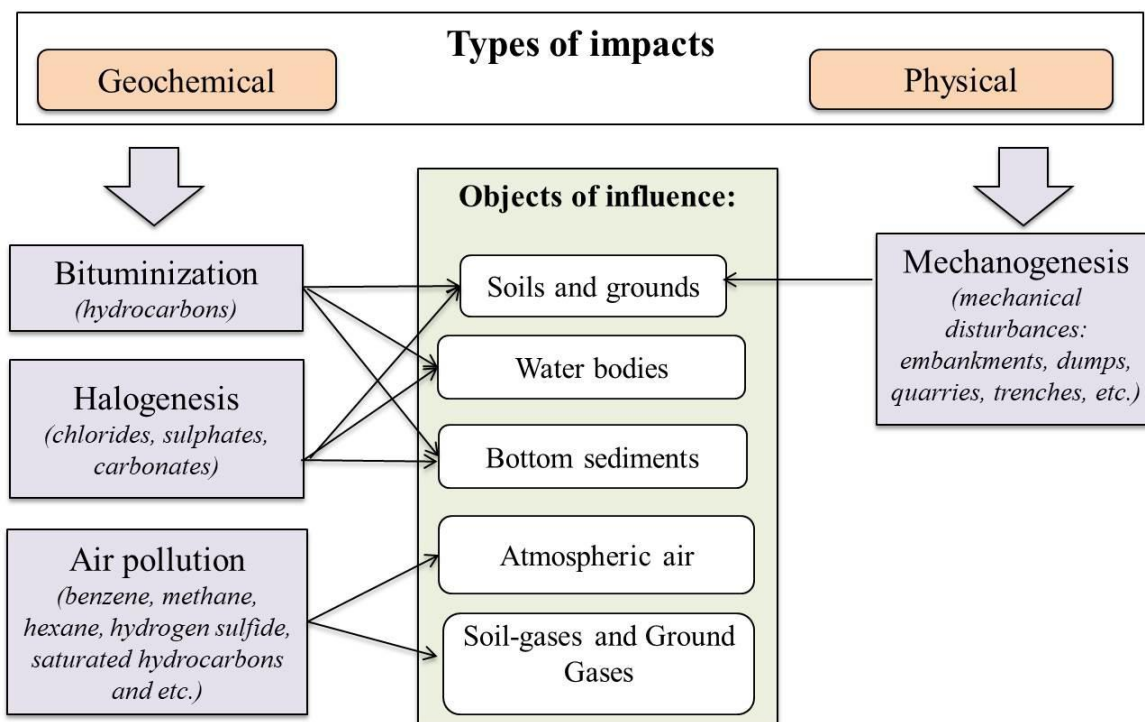


Fig. 1. Technogenesis of oil fields

Геоинформационные системы. Использование геоинформационных систем (ГИС) становится ключевым инструментом для обеспечения экологической безопасности территорий. Геоинформационные технологии позволяют объединить результаты прямых полевых наблюдений за состоянием окружающей среды с лабораторными исследованиями устойчивости основных компонентов

экосистем к природному и антропогенному воздействию.

На сегодняшний день ГИС применяют в таких отраслях, как: отслеживание лесных пожаров, контроль оползневых территорий, предотвращение незаконных вырубок, разливы нефти и других опасных химических веществ, оценка воздействий опасных гидрометеорологических явлений и т.п.

Часто геоинформационные системы используются в области охраны природы и при оценке воздействия опасных гидрометеорологических явлений на жизнь людей. Средствами ГИС могут быть построены цифровые модели уязвимостей городских кварталов к пыльным и песчаным бурям [55], восприимчивости регионов к оползням [115], оценка ущерба на прибрежных территориях вследствие штормов [113] и другие.

Наряду с природными, техногенные факторы, оказывающие влияние на окружающую среду, также становятся предметом исследования. Например, с помощью ГИС китайскими учеными, создавалась модель оценки воздействия морских судов на прибрежные заповедные зоны, наглядно представленная в работе [114]. При помощи ГИС произведено моделирование траектории разливов нефти и картографирование уязвимости окружающей среды к разливам с использованием модели GNOME в Малайзии [53]. Для оценки экологических рисков и экологической безопасности в бассейне Чамширской плотины (Иран), где потенциальный источник воздействия – система нефтепроводов, также были использованы геоинформационные системы. С их помощью выявлены уязвимые зоны, где риск разливов нефтепродуктов и необратимое воздействие на прибрежную экосистему исключительно высок [59]. Совместно с аэрометодом ГИС-технологии применены для определения экологической безопасности при добыче и транспортировке углеводородов на острове Сахалин [7]. Проведена ГИС оценка экологических воздействий нефтегазовой промышленности в Арктическом регионе, которая позволила оценить и смоделировать загрязнение атмосферного воздуха, для обеспечения экологической безопасности в регионе и предотвращения возможных чрезвычайных ситуаций [27]. Для города Грозного разработана геоинформационная система для выявления природных ландшафтов, загрязнённых нефтепродуктами, обеспечения своевременной реабилитации и рекультивации загрязнённых территорий с целью поддержания на территории города экологической безопасности [28].

Чаще всего рабочей программой при использовании геоинформационных методов выступает программа ArcGIS (ESRI). Сбор, хранение и анализ фоновых данных, материалов полевых обследований, ДДЗ, будет осуществляться в форме реляционной, пространственно-временной, полимасштабной базы геоданных. Эта форма позволяет одновременно работать как с растровыми данными (аэрофотосъёмка, космические изображения, топографические карты),

так и с векторной информацией (нефтепромышленные объекты; пункты проведения наблюдений и измерений; результаты лабораторного исследования отобранных образцов природных сред и биотестирования; дифференциация модельных участков на базовые экосистемы). Она позволяет проводить анализ геоинформационных данных при помощи комплекса методов: оверлейные операции (наложение одного или нескольких слоев друг на друга), набор инструментов пространственного анализа (вырезание, разбиение, стирание, объединение, пересечение, выборка, создание буферных зон), набор инструментов для работы с растровыми данными и построения цифровых моделей (например, распространения загрязнения) Spatial Analyst (интерполяция дискретных данных по площади – построение GRID-моделей; растровый калькулятор и другие математические операции с растром, анализ направления стока, выделение водосборных областей), набор инструментов для работы с трехмерными данными 3D Analyst (построение TIN-моделей, расчет объемных показателей, построение ареалов загрязнений). Роль конкретной аналитической модели выполняет геоинформационная база данных.

Использование геоинформационных систем для сбора информации о состоянии окружающей природной среды, выполнения экологической оценки, поисковых и нормативных прогнозов, разработки мероприятий по восстановлению природной среды позволяет выйти на новый уровень рационального недропользования [1, 41].

Первичная структура и состав ГИС для контроля качества окружающей среды, обеспечивающей экологическую безопасность в районах совместного размещения особо охраняемых природных территорий и эксплуатируемых нефтяных месторождений представлена на рисунке 2 / fig. 2. Геоинформационная база данных состоит из трех основных блоков: наблюдение, оценка и прогноз. Наблюдение происходит дистанционно с применением БПЛА и данных ДЗЗ совместно с прямыми визуальными исследованиями. После получения первичных данных наблюдений выявляются пространственно-временные параметры техногенеза. Далее осуществляется оценка состояния природных объектов, для каждого компонента природной среды разрабатываются критерии состояния с помощью лабораторно-аналитических методов. На основе полученных данных составляются карты геоэкологической ситуации для участков совместного размещения особо охраняемых природных территорий и эксплуатируемых нефтяных месторождений.

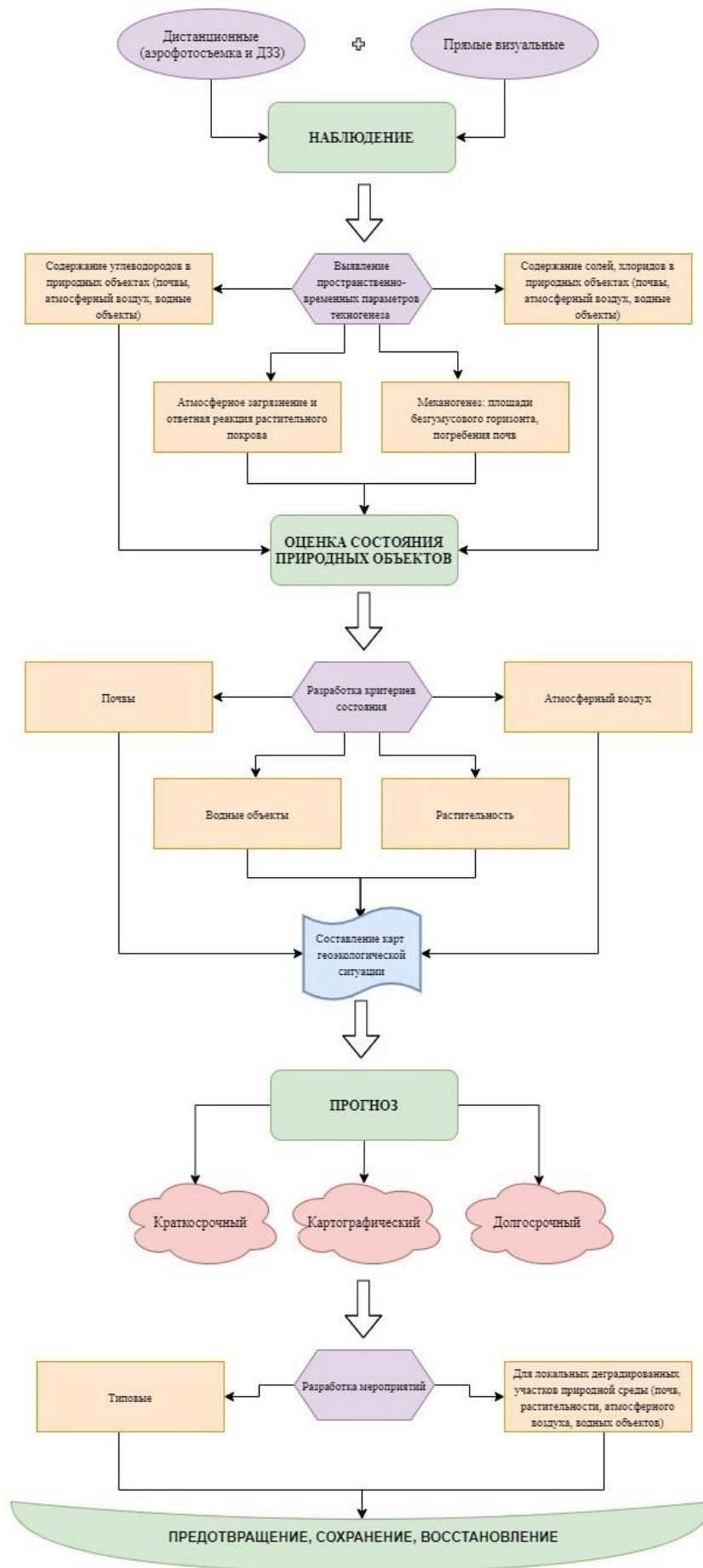


Рис. 2. Структура геоинформационной базы данных

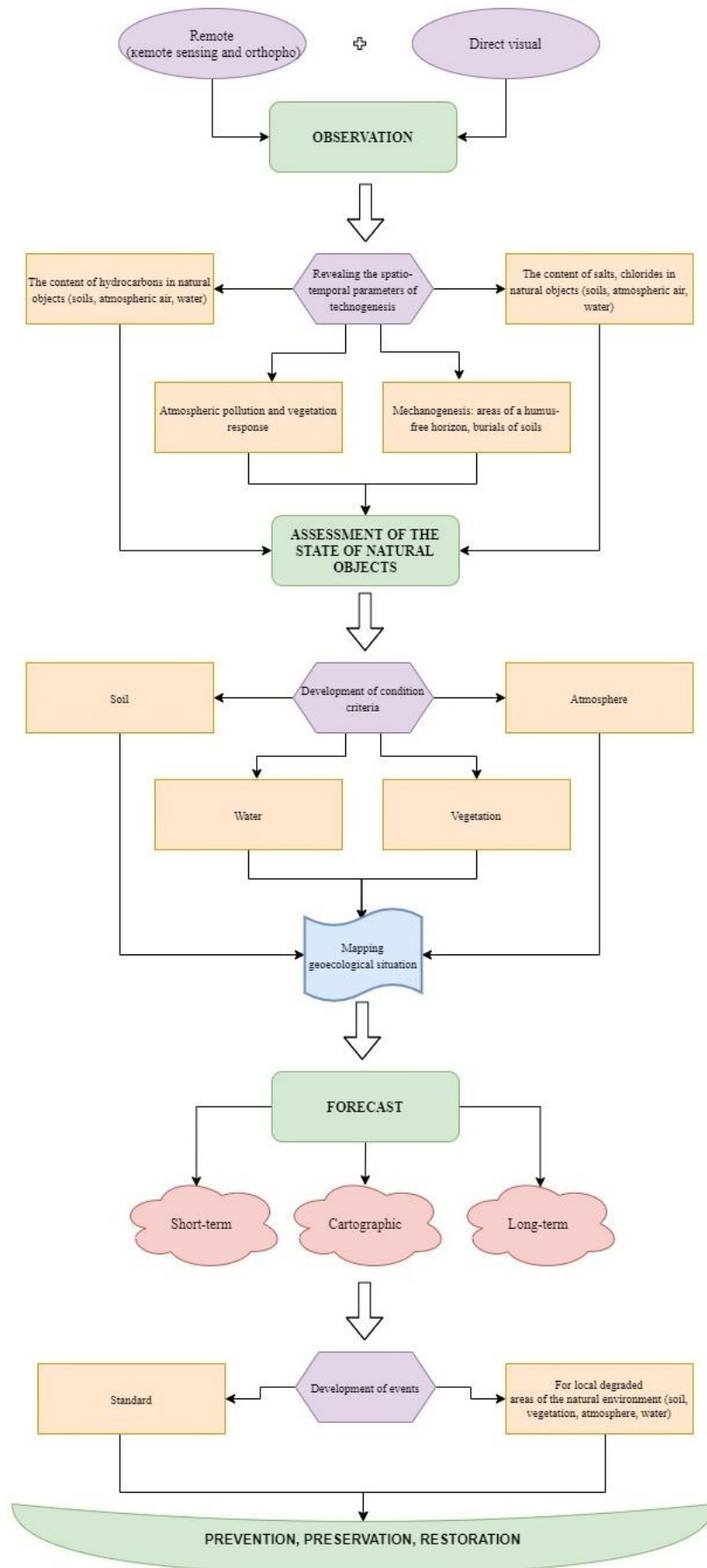


Fig. 2. Geographic information database structure

На завершающем этапе работ, БД позволяет сделать прогноз развития ситуации на исследуемой территории и разработать мероприятия, направленные на предотвращение загрязнения, сохранение и восстановление природной среды.

Дистанционное зондирование с помощью беспилотного летательного аппарата. Активный рост применения беспилотной аэрофотосъемки последние 15–20 лет закономерно отмечается во многих отраслях. Материалы съемки используются для решения как фундаментальных научных задач, так и задач прикладного характера [80]. К их числу относятся и нефтедобыча, а также ряд смежных областей.

Наиболее острая и заметная проблема в нефтепромысловом технологическом процессе – разливы нефти. Нефть обладает достаточно специфическими оптическими свойствами, а её попадание на почву или в водные объекты приводит к заметным изменениям ряда физических параметров природных сред. Это создает объективную основу для регистрации и изучения разливов при помощи БПЛА [75].

В целом, за последние 50 лет (2017-2019) число научных публикаций, посвященных выявлению и картированию нефтяных разливов, неуклонно росло (рис. 3 / fig. 3) [110].

Наиболее активно эту тему исследуют ученые из Китая, Италии и США [110].

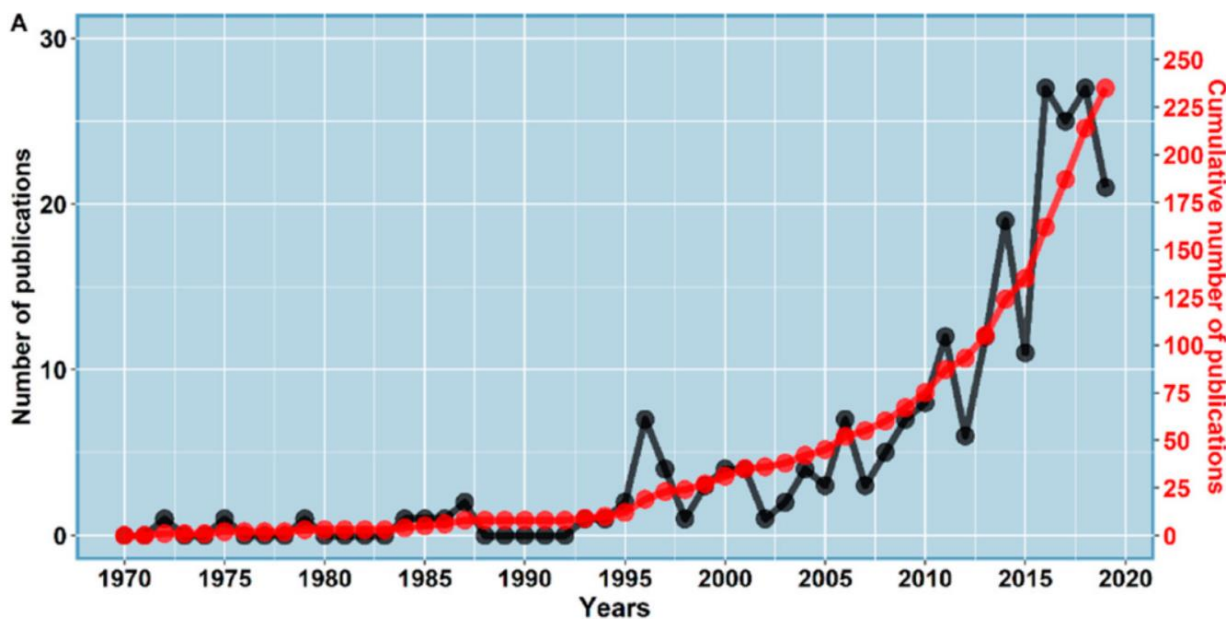


Рис. 3. Число научных публикаций (индексированных в Scopus) о выявлении и картировании разливов нефти за период 1970-2019 гг. [110]

Fig. 3. Annual growth rate of Oil Spills Detections and Mapping publications indexed in the Scopus database per year (1970–2019) [110]

В настоящее время на борту БПЛА может быть установлен достаточно широкий спектр сенсоров различного типа и назначения [72]. Выбор подходящего типа сенсора, относительно поставленных задач, масштаба, специфики техногенеза и применимости в различных условиях, занимает важное место в современной научной литературе [112].

Серьезное внимание уделяется изучению нефтепромыслового воздействия объектов линейной инфраструктуры (прежде всего нефтепроводов) [112]. Помимо подходов к регистрации порывов, разливов, реакции биоты [72], идет разработка оптимизационных алгоритмов подготовки полетного задания для БПЛА, позволяющих экономить ограниченный ресурс времени полета [95].

При возникновении чрезвычайных ситуаций на участках нефтедобычи возможны взрывы, пожары, долговременные горения. На удаленных участках, при отсутствии постоянных работников слежение за оча-

гами горения [90], за дымовыми шлейфами [111] может проходить при помощи БПЛА. Существуют отдельные примеры использования беспилотной техники и для тушения возгораний [54]. На первых (разведочно-буровых) этапах «жизненного цикла» нефтепромысла, орфтофотопланы дают высокоточную основу для регистрации [70] и численной оценки ущерба, нанесенного лесам, в результате рубок при организации объектов нефтепромысла [96].

В староосвоенных районах существенная проблема – поиск заброшенных недействующих скважин. Один из интересных вариантов решения этой задачи – использование магнитометра (для выявления устьевых металлических частей скважин) в качестве сенсора БПЛА [62].

Мультиспектральная аэрофотосъемка успешно применяется для оценки эффективности восстановления техногенно преобразованных земель [93] или степени их текущей деградации [97].

Поскольку в России, в целом, и в Пермском крае, в частности, много нефтяных месторождений расположено в лесной зоне, важный идентификационный признак механогенеза, галогенеза, битумизации – реакция биоты – прежде всего, древостоя. Немалое число статей посвящено различным аспектам изучения лесов средствами аэрофотосъемки [51, 64, 85, 101]. Имеются работы, посвященные дешифрированию видового состава лесов [66, 71]. Определение отдельных технических параметров древостоев возможно, как при помощи лазерных сенсоров – лидарной съемки [87, 103], так и съемок в оптическом диапазоне [2]. Важным ответвлением этой темы следует считать идентификацию болезней, биологических повреждений леса, сухостойных деревьев. Часто исследования опираются на известную спектральную разницу фотосинтетически активной поверхности в красном и ближнем инфракрасном диапазонах [60, 76, 86]. Существуют примеры использования и панхроматических сенсоров [37, 78].

Первичная обработка результатов аэрофотосъемки позволяет создать ортофотоплан. Методика этого процесса достаточно подробно описана в ряде наших предыдущих публикаций [10, 38]. Последовательность основных этапов этой процедуры выглядит следующим образом. Определение положения и выравнивание фотографий относительно друг друга – создание разреженного облака точек и корректировка ошибок – расчет «глубины» каждого снимка и создание плотного облака точек – дифференциация точек на классы – создание цифровой модели местности (ЦММ) и цифровой модели рельефа (ЦМР), создание 3D-моделей местности (при

необходимости). Дальнейшая обработка изображений проводится в соответствии с программой Photomod UAS. Она необходима для дополнительной коррекции снимков, достижения геодезической точности получаемых продуктов. В сжатом виде процедуру обработки можно представить в виде следующих этапов: сжатие снимков, привлечение данных внутреннего и внешнего ориентирования, создание сети опорных точек – добавление точек, с заранее определенными (геодезическим способом) координатами, для повышения точности ортофотоплана – уравнивание положения снимков относительно друг друга, определение линий порезов – глобальное и локальное выравнивание яркостей изображений – настройка выходных параметров и экспорт ортофотоплана.

Дополнительным источником информации станут материалы мультиспектральной космической съемки среднего (Landsat-8, 30 м) и высокого разрешения (Sentinel-2, 10 м), имеющиеся в свободном доступе. В отличие от аэрофотосъемки космические снимки, включают информацию по нескольким спектральным каналам, что существенно расширяет возможности дальнейшего дешифрирования. В целом анализ снимков будет основан на различиях в спектральных кривых различных экосистем и поиске признаков техногенного нарушения, которое характерно для участков развития нефтепромыслов.

Схематичное представление о роли блока «ди-станционных методов» при разработке ГИС для обеспечения экологической безопасности в районах совместного размещения нефтяных месторождений и ООПТ, показано на рис. 4 / fig. 4.

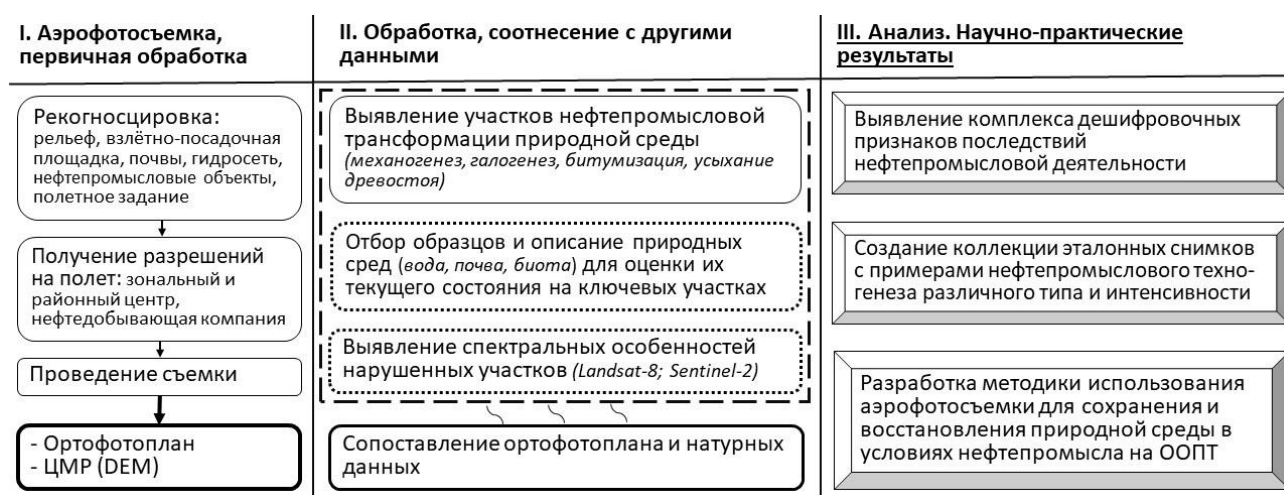


Рис. 4. Последовательность работ и результаты применения аэрофотосъемки для изучения, сохранения и восстановления природной среды на нефтепромысловых участках

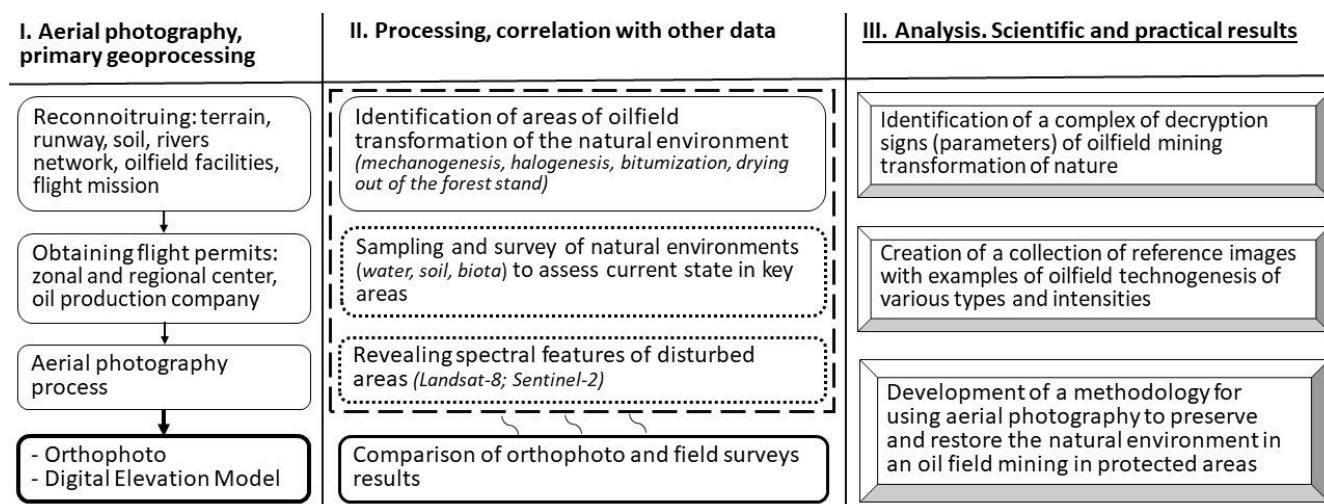


Fig. 4. Sequence of steps and results of aerial photography for studying, preserving and restoring the natural environment in oil field areas

Биотестирование. Моделирование техногенной трансформации наиболее важных процессов для определения устойчивости компонентов экосистем к загрязняющим веществам возможно методами биотестирования. И встает вопрос о том, какие тест-объекты более применимы при изучении токсичности почв и вод, загрязненных нефтью и нефтепродуктами.

Применение биотестирования, наряду с методами физико-химического анализа, как сказано в работе Shen [106], позволяет оценить комплексное влияние загрязнителей на компоненты природной среды и экосистемы в целом. Это важно, так как достаточно сложно при исследованиях экосистем определить степень влияния каждого отдельного поллютанта, которые попадают в среду при загрязнение нефтью и нефтепродуктами.

Н.А. Киреева и др. [21] составили рекомендации, по проведению биотестирования нефтезагрязненных почв, которые заключаются в следующем [21]: тест система должна включать представителей двух трофических уровней – автотрофов и гетеротрофов; иметь в своем составе представителей основных царств живого – бактерий, грибов, растений, животных; включать тест-организмы, хорошо растущие в лабораторных условиях, а так же организмы, обладающие высокой чувствительностью к исследуемым загрязнителям природной среды; включать такие тест-реакции тест-объектов, регистрация которых не требует использования сложной и дорогостоящей аппаратуры, но в то же время несущие достаточный объем информации.

По данным авторов [21], при биотестировании почв нефтезагрязненных территорий чаще всего в качестве тест-объектов используют почвенные микроорганизмы и беспозвоночных. Но нужно отметить, что и применение растений в качестве тест-объектов распространено так же широко [16]. Во многих исследованиях, в качестве тест-объектов используются бактерии [32, 56, 87, 99].

В работе А.В. Арзамасовой [3] говорится, что тест-функции, которые учитываются методами биотестирования на основе высших растений рассматривают всхожесть семян, энергию прорастания семян, длину корней и стеблей проростков семян, интенсивность роста побегов, фитомассу растений и некоторые другие параметры.

Есть три варианта методов по фитотестированию [94]: лабораторные, вегетационные (горшечные) и микроплощадочные. Из них более распространенными остаются лабораторные, благодаря следующим преимуществам [94]: высокая чувствительность, простота, компактность, относительная дешевизна, доступность и сохранность тест-объекта (растительных семян).

Р.М. Дауд с соавторами проводили фитотестирование почв, загрязненных нефтью, мазутом [12, 13, 61] и бензином [22], с целью изучения устойчивости аридных экосистем. Авторами сделаны выводы о том, что при загрязнении нефтью и нефтепродуктами было наиболее показательным исследование фитотоксичности (в качестве тест-объекта использовался редис), в частности, выявлено большое влияние загрязнения на изменение длины корней. В целом авторы [12, 13, 61] определяли общую численность бактерий, обилие бактерий рода *Azotobacter*, активность каталазы и дегидрогеназы, целлюлозолитическую способность, фитотоксические свойства. Помимо загрязнения нефтью и нефтепродуктами, С.И. Колесников и др. [12] изучали влияние загрязнения почв микроэлементами на фитотоксичность, которое также возможно на территориях, находящихся под воздействием нефтедобычи.

Füleky G. & Barna S. [68] так же исследовали влияние загрязнения микроэлементами на фитотоксичность, проводя эксперименты с загрязненными почвами на плевеле многолетнем (*Lolium perenne*).

Тест-объектов, которые используют при фитотестировании нефтезагрязненных сред достаточно мно-

го. Наиболее часто при фитотестировании применяются следующие тест-объекты: семена салата (*Lepidium sativum*) [100], кресс-салат (*Lepidium sativum*) [15], редис (*Raphanus sativus*) [109], сорго (*Sorghum bicolor*) [65], люцерна (*Medicago*) [65], бобы (*Phaseolus vulgaris*) [109], семена лука (*Allium cepa*) [109], клевер (*Trifolium*) [17], ячмень (*Hordeum vulgare*) [59], пшеница мягкая (*Triticum vulgare*) [3, 22].

Перечисленные растения в основном луговые, но стоит понимать, что загрязнению нефтью и нефтепродуктами подвергаются различные ассоциации, в том числе лесные. Следовательно, возникает необходимость фитотестирования на растениях, слагающих лесные фитоценозы. В таком случае можно выделить сосну обыкновенную (*Pinus sylvestris*) и ель сибирскую (*Picea obovata*), которые чаще принято применять в роли биоиндикаторов, а не тест-объектов [47].

Широкое распространение имеют тест-объекты из числа одноклеточных растений, беспозвоночных животных и микроорганизмов. Многие исследователи [57] используют одноклеточную водоросль хлореллу (*Chlorella vulgaris*), эксперименты с которой проводятся в лабораторных условиях. Наряду с ней, такое же широкое распространение получили рачки дафний (*Daphnia magna*), которые выступают в роли тест-объектов во многих исследованиях [56, 105, 108, 118]. Эксперименты с ними проводятся в лабораторных условиях. Часто эти тест-объекты применяются в паре, что объясняется их принадлежностью к различным таксономическим группам.

Загрязнение почв нефтью и продуктами ее переработки негативно сказывается на состоянии всех компонентов микробиома почвы [49, 52, 67, 74, 89, 104]. Присутствие нефти и нефтяных углеводородов в почве приводит к изменению физико-химических и биологических показателей [50, 57, 63, 73, 98, 116, 117]. Существенное влияние такое загрязнение оказывает на численность и биоразнообразие почвенных микроорганизмов [79].

Механизм влияния нефтяного загрязнения на микробиому может носить как прямой, так и опосредованный характер. В случае опосредованного влияния происходит существенное изменение физико-химических параметров: возникновение микроаэрофильных условий в случае проникновения нефти в почвенные слои, изменение гидрофобности почвенных частиц и регуляции углекислого газа в почве [74, 76 100]. Такие изменения оказывают негативный эффект на микробные сообщества почв, вызывая снижение численности и разнообразия организмов [49, 91, 100, 102]. Прямое влияние нефтяного загрязнения будет проявляться в том случае, если в почве присутствуют микроорганизмы, способные использовать углеводороды нефти в качестве источника углерода [49, 91].

Известно, что почвы формируются длительное время под действием комплекса геохимических

факторов и отличаются как по механическому, так и по химическому составу [92]. Можно предположить, что в почвах разных групп/типов/классов нефтяное загрязнение будет оказывать различный эффект на почвенные микроорганизмы. Однако в литературе представлены единичные работы, отражающие изменения, обусловленные нефтяным загрязнением, в том или ином типе почвы [49, 57, 81].

На территории Пермского края (Россия) в районах нефтедобычи основная доля почв приходится на дерново-подзолистые, дерново-карбонатные, светло-серые, темно-серые и пойменные [84]. Исследованиями установлено, что нефтяное загрязнение таких почв приводит к снижению видового разнообразия почвенных бактерий. Однако, выявлены различия в изменении численности бактериоценозов разных типов почв при низких и высоких дозах нефтяного загрязнения. Так, дозы, характерные для аварийных разливов негативно влияют на численность микроорганизмов во всех изученных типах почв. Напротив, низкие дозы нефтяного загрязнения стимулировали развитие гетеротрофной микрофлоры в дерново-подзолистой, темно-серой и пойменной почвах. Можно предположить, что в микробоценозах данных почв существенную долю занимают нефтеокисляющие микроорганизмы, способные использовать нефтяные углеводороды как источник углерода для метаболических процессов клетки. Полученные результаты существенно отличаются от данных для нефтезагрязненного чернозема [81-83]. Таким образом, реакция микробоценоза почвы на нефтяное загрязнение зависит как от видового состава, так и от типа почвы.

Описание эксперимента по биотестированию нефти и нефтепродуктов. На рисунке 5 / fig. 5 представлена общая схема биотестирования для почв, на рисунке 6 / fig. 6 – для водных объектов.

Вегетационный хронический эксперимент проводится в соответствии с методикой определения фитотоксичности. В качестве тест-объектов можно использовать четыре вида растений – пшеницу мягкую (*Triticum aestivum*) и кресс-салат посевной (*Lepidium sativum*), ель сибирскую (*Picea obovata*) и сосну обыкновенную (*Pinus sylvestris*). Число повторностей каждого варианта – 4. В качестве критерия фитотоксического действия поллютанта использовано снижение фитопродуктивности растений на 20% и более, по сравнению с контрольными вариантами. Микробиологическое исследование почв включает изучение динамики численности и разнообразия экологотрофических групп бактерий в почвах разного типа при дифференцированном нефтяном загрязнении от контроля до 300 г/кг. Подсчет числа клеток производили путем их посева на плотные питательные среды. В основе метода лежит принцип Коха, согласно которому каждая колония является потомством одной клетки.



Рис. 5. Схема биотестирования почв, загрязненных нефтью и подтоварными водами

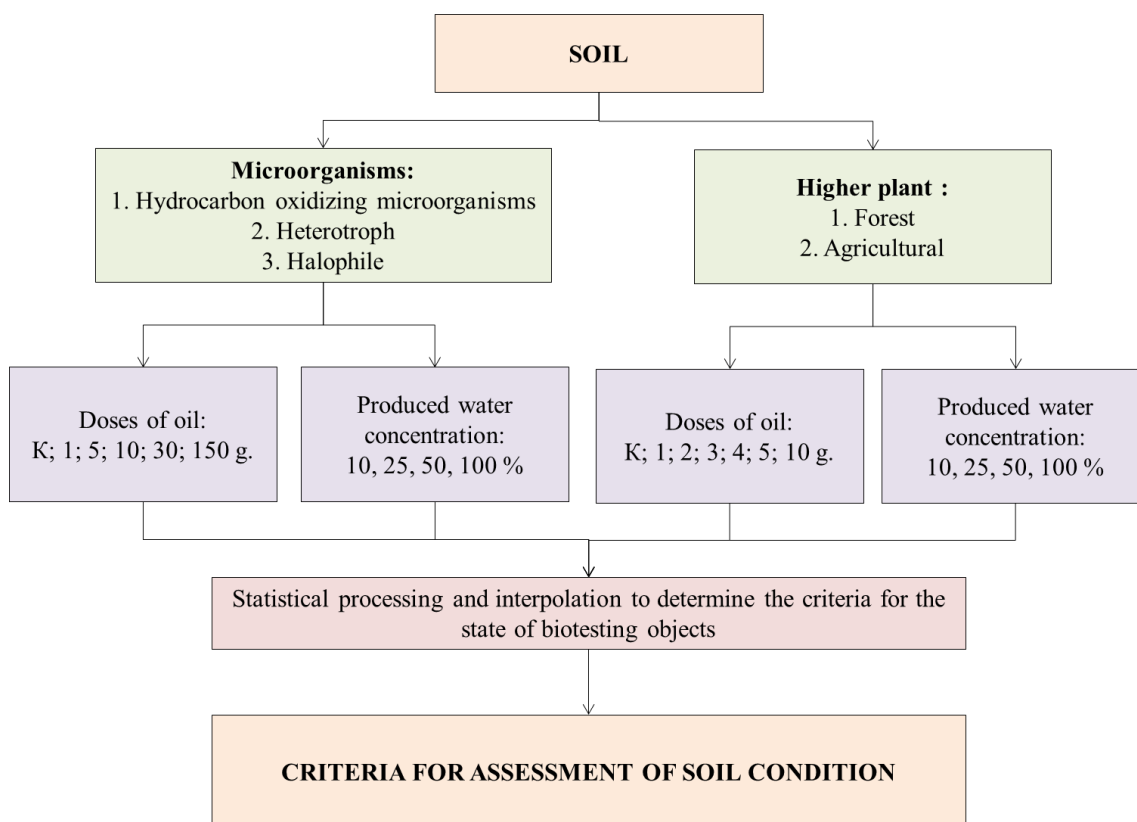


Fig. 5. Design of an experiment on bioassay of soils contaminated with oil and produced water

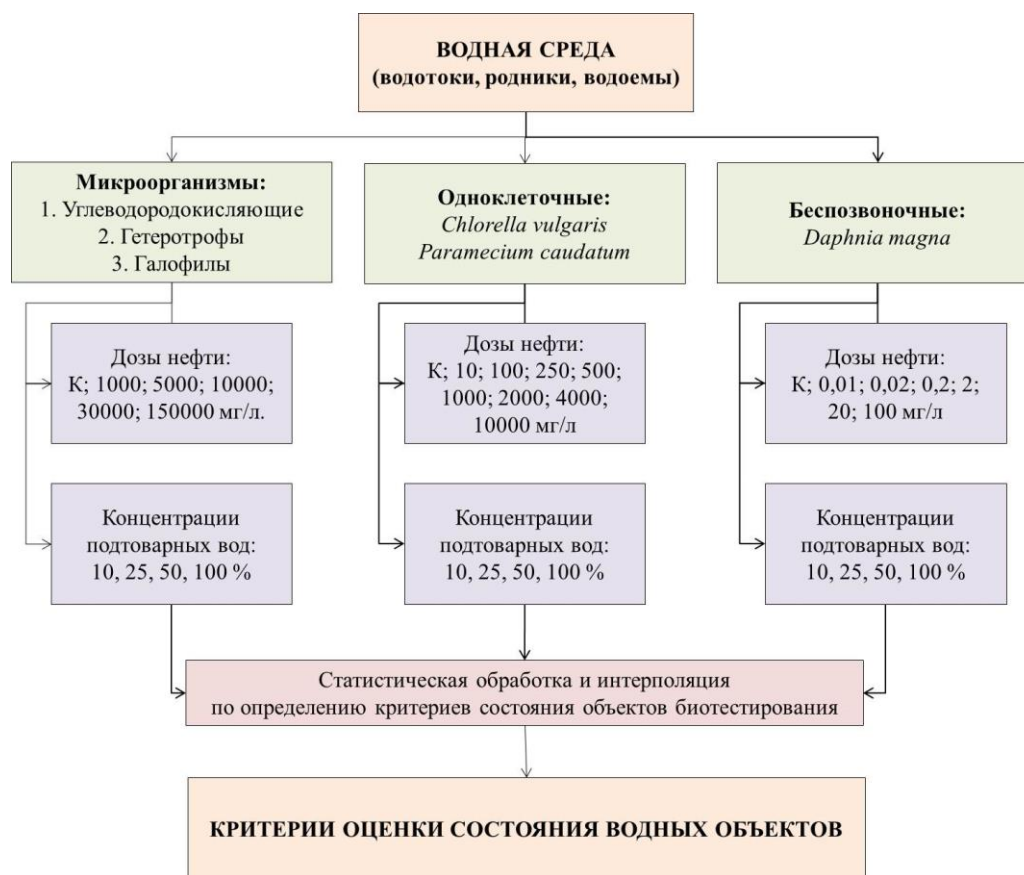


Рис. 6. Схема биотестирования водных объектов, загрязненных нефтью и подтоварными водами

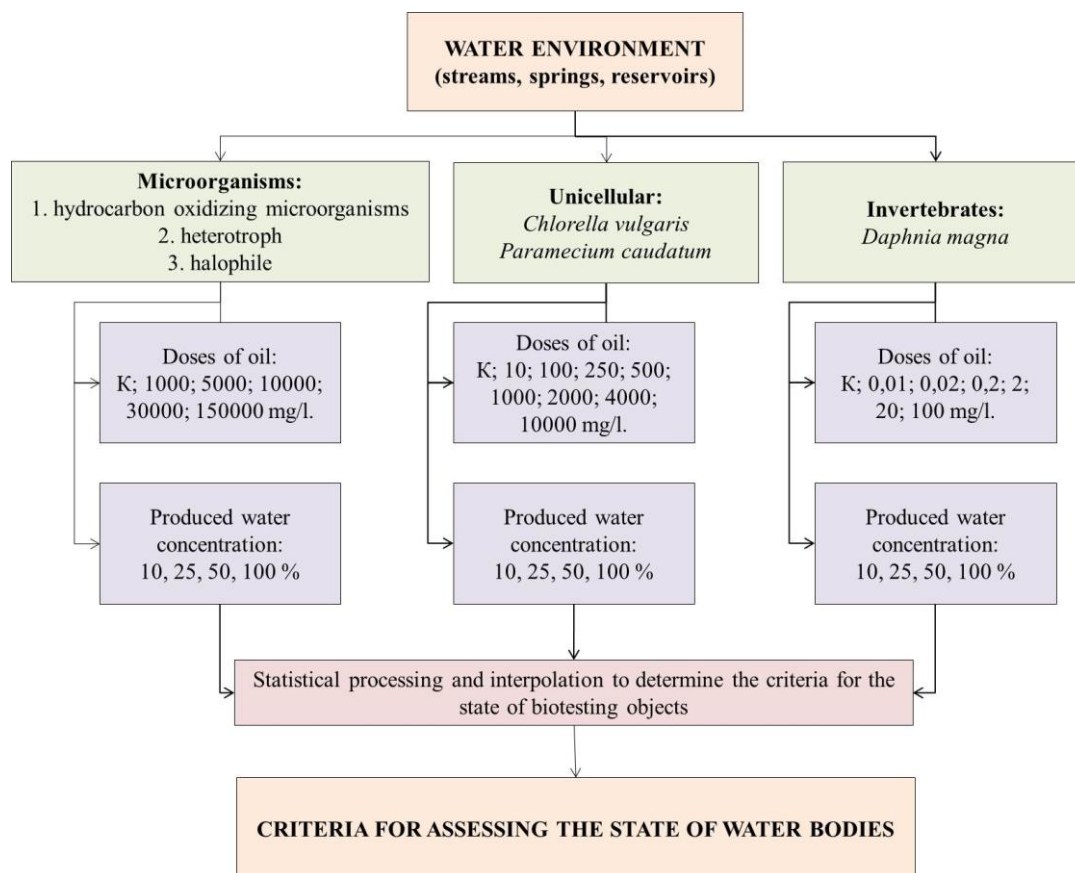


Fig. 6. Design of an experiment on bioassay of waters contaminated with oil and produced water

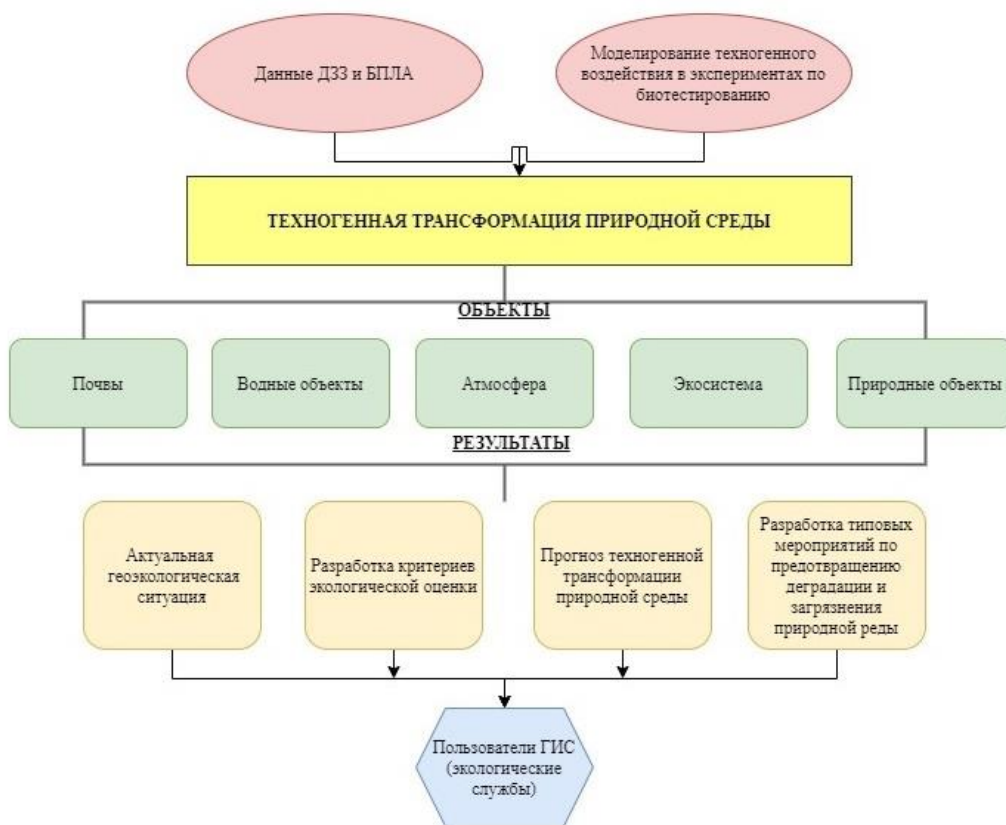


Рис. 7. Структура геоинформационной системы для экологической безопасности территорий

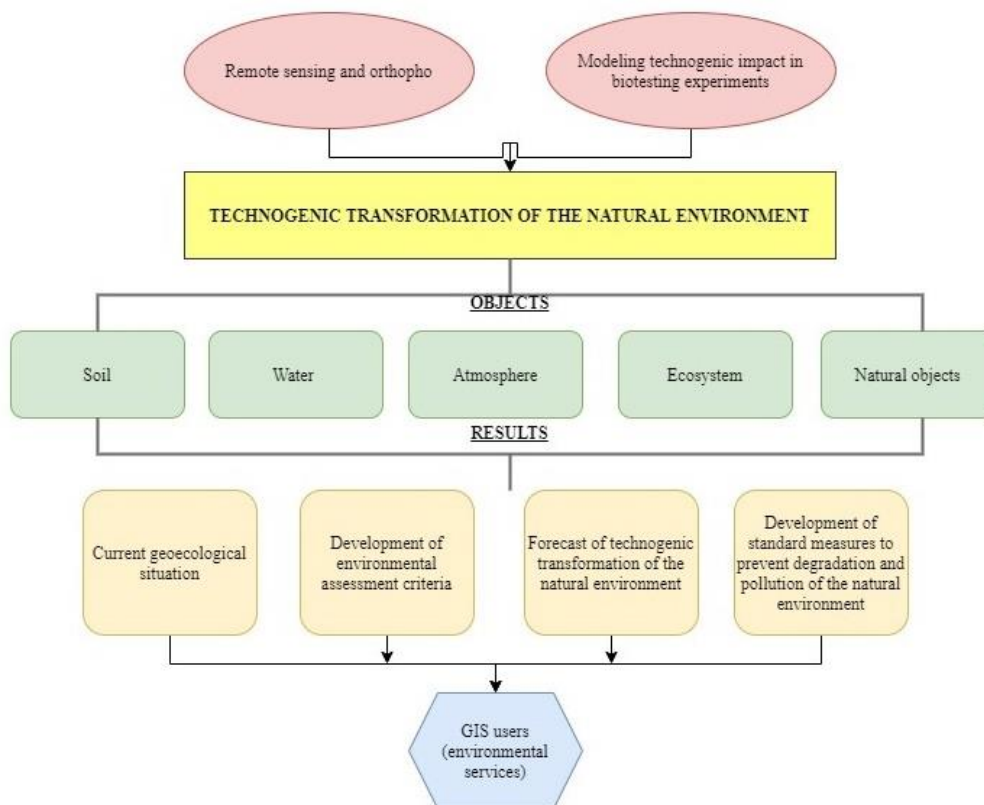


Fig. 7. The structure of the geographic information system for the environmental safety of territories

Описание морфотипов осуществляли по общепринятым методикам. Для определения влияния на водную среду и токсичности водной вытяжки почв эксперимент ставился на объектах *Chlorella vulgaris*, *Daphnia magna*. Токсичность оценивается по снижению на 20% и более (подавление роста) или увеличению на 30% и более (стимуляция роста) величины оптической плотности культуры водоросли. Для каждой пробы высчитывалась величина токсичной кратности разбавления.

В результате, разработана схема эксперимента по биотестированию почв, загрязненных нефтью и подтоварными водами, включающая тест-объекты из различных таксономических групп: бактерии, растения и животные. Бактерии представлены тремя экологотрофическими группами: нефтеокисляющие, гетеротрофные, галофильные. В группе растений выделены одноклеточные и многоклеточные; однодольные и двудольные; цветковые и хвойные; сельскохозяйственные и лесные.

Результаты эксперимента позволяют дополнить ГИС для контроля качества окружающей среды, обеспечивающей экологическую безопасность в районах совместного размещения особо охраняемых природных территорий и эксплуатируемых нефтяных месторождений (рис. 6 / fig. 6).

Объединение данных дистанционного зондирования Земли и аэрофотосъемки с помощью БПЛА с результатами эксперимента по биотестированию нефти и нефтепродуктов позволяют оценить актуальную геоэкологическую ситуацию, разработать критерии экологической оценки, дать прогноз техногенной трансформации природной среды и разработать мероприятия, направленные на предотвращение загрязнения, сохранение и восстановление природной среды для территорий с совместным расположением ООПТ и объектов нефтепромысла.

Заключение

Развитие систем управления качеством окружающей среды на базе ГИС должно позволять своевременно и регулярно получать качественную информацию (т.е. полную, достоверную и точную) для того, чтобы вовремя принять эффективные меры сохранения природной среды и предотвращения деградации и загрязнения экосистем.

Современный уровень развития теории техногенной трансформации природной среды делает возможными выявление негативных последствий нефтедобычи, разработки геоэкологической оценки, прогнозы и мероприятия по восстановлению природных объектов.

Существуют реальные возможности дистанционного зондирования значительных площадей районов месторождений с помощью беспилотного летательного аппарата и дешифрирования полученных данных.

Биотестирование позволяет моделировать техногенные процессы, определять и рассчитывать количественные критерии для проведения экологической оценки на локальных территориях.

Геоинформационные системы позволяют создавать пространственные и временные базы данных, способные не только накапливать результаты обследований, но и создавать картографические модели для оценки, прогноза геоэкологической обстановки.

Анализ научных литературных данных показывает, что существуют технологические возможности для создания ГИС в целях контроля качества окружающей среды, обеспечивающей экологическую безопасность в районах нефтяных месторождений. Необходимые карты и слои ГИС: почвенная, водосборных бассейнов, природно-технических систем, развития техногенных процессов, мероприятий по восстановлению природной среды.

Представляется важной отработка методики дистанционного зондирования с использованием БПЛА в районах размещения нефтяных месторождений и ценных природных объектов.

Целесообразна разработка методики для определения закономерностей и уровней воздействия остаточной нефти и техногенных рассолов на локальные природные объекты, местные почвенные и водные экосистемы по результатам биотестирования.

Разработка регламентов типовых мероприятий по ремедиации экосистем при различных уровнях загрязнения, при битумизации, галогенезе земель и водных объектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 20-45-596018.

Список использованной литературы

1. *Абрамян С.Г.* Концепция создания ГИС-технологий для экологического мониторинга // Интернет-вестник ВолГАСУ. Сер. Строит. информатика. 2010. Вып. 4 (11). С 1–5.
2. *Алешко Р.А., Алексеева А.А., Шошина К.В., Богданов А.П., Гурьев А.Т.* Разработка методики актуализация информации о лесном участке с использованием снимков со спутников и малых БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 87–99.
3. *Арзамазова А.В., Кинжаев Р.Р., Трофимов С.Я.* Опыт применения яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L) в целях фитотестирования нефтезагрязненных почв // Проблемы агрохимии и экологии, № 2, 2016, С. 47–51.
4. *Бабушкин А.Г., Московченко Д.В., Пикунов А.В.* Гидрохимический мониторинг поверхностных вод Ханты-Мансийского автономного округа-Югры. Новосибирск: Наука, 2007.
5. *Бачурин, Б.А., Одинцова Т.А.* Проблемы диагностики и контроля нефтяных загрязнений природных геосистем // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2005. № 9–10. С. 79–82.
6. *Бачурин, Б.А., Одинцова Т.А., Борисов А.А.* К методике идентификации источников нефтезагрязнения геологической среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 10. С. 291–298.
7. *Биненко В.И., Черноок В.И., Иванов Р.В.* Экологическая безопасность добычи и транспортировки углеводородов на острове Сахалин на основе использования аэрометодов и ГИС-технологий // Региональная экология. 2010. № 3 (29). С. 18–23.

8. Бродский Е.С., Савчук С.А. Определение нефтепродуктов в объектах окружающей среды // Журнал аналитической химии. 1998. Т. 53. № 12. С. 1238–1251.
9. Бузмаков С.А. Антропогенная трансформация природной среды // Географический вестник = Geographical bulletin. 2012. 4 (23). С. 46–50.
10. Бузмаков С.А., Андреев Д.Н., Санников П.Ю. Применение беспилотного летательного аппарата при исследовании состояния лесов // Геология, география и глобальная энергия. №4, 2015. С. 60–69.
11. Бузмаков С.А., Костарев С.М. Техногенные изменения компонентов природной среды в нефтедобывающих районах Пермской области. Пермь: Перм. ун-т, 2003.
12. Дауд Р.М., Колесников С.И. Влияние загрязнения бензином на фитотоксичность почв аридных экосистем юга России: сб. материалов конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования», Ростов-на-Дону – Таганрог, 2018, С. 29–31.
13. Дауд Р.М., Колесников С.И., Кузина А.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В. Разработка региональных предельно допустимых концентраций нефти в почвах аридных экосистем юга России // Экология и промышленность России, Т. 23(9), 2019, С. 66–70. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-09-66-70
14. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. Практическое руководство. СПб.: Анатолия, 2000.
15. Еремченко О.З., Москвина Н.В., Митракова Н.В., Колбик А.Е., Пахоруков И.В. Оценка экологического состояния засоленных, кислых и щелочных почв методом фитотестирования // Вестник Пермского университета. Серия: Биология, №1, 2019, С. 63–71. DOI: 10.17072/1994-9952-2019-1-63-71.
16. Зильберман М.В., Порошина Е.А., Зырянова Е.А. Биотестирование почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, Пермь: ФГУ УралНИИ Экология. 2005. 111 с.
17. Иларионов С.А., Назаров А.В., Калачникова И.Г. Роль микромицетов в фитотоксичности нефтезагрязненных почв // Экология, № 5, 2003, С. 341–346.
18. Казанцева М.Н., Сванидзе И.Г. Структура и биоразнообразие луговых фитоценозов долины реки Аремзянки при антропогенном засолении почв // Экологический мониторинг и биоразнообразие. 2014. №1. С. 6–12.
19. Казанцева М.Н., Сванидзе И.Г. Трансформация лесного фитоценоза в южной тайге Западной Сибири под действием минерализованных пластовых вод // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2016. Т. 2. № 3. С. 71–81.
20. Калантаевский Ю.С., Александрова А.В., Ксандопуло С.Ю., Левчук А.А., Соловьева Ж.П. Применение географических информационных систем для экологического мониторинга в нефтегазовом комплексе // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. С 1–10.
21. Киреева Н.А., Кабиров Т.Р., Дубовик И.Е. Комплексное биотестирование нефтезагрязненных почв // Теоретическая и прикладная экология, №1, 2007. С. 12–17.
22. Киселёв М.В., Башарина М.В. Определение степени токсичности почвы, очищенной от нефтезагрязнения биологическими препаратами, в условиях северо-запада РФ // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, № 59, 2020, С. 64–69. DOI: 10.24411/2078-1318-2020-12064
23. Колесников С.И., Дауд Р.М., Кузина А.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В. Региональные нормативы содержания мазута в аридных почвах юга России // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, 2019, №3(288), С. 25–29. DOI: 10.33285/2411-7013-2019-3(288)-25-29.
24. Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А. Заграничный К.А. Нефтяное загрязнение береговой зоны Черного моря в районе г. Новороссийска (по результатам многолетних исследований) // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2013. №1. С. 71–77.
25. Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А. Нефтяное загрязнение в водных экосистемах. Закономерности естественной трансформации. Saarbrucken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG. 2011.
26. Кузнецов А.Н., Федоров Ю.А. Нефтяные компоненты в устьевой области р. Дон и в Азовском море (результаты многолетних исследований) // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 49–59.
27. Куракина Н.И., Мышко Р.А. ГИС оценки экологических воздействия нефтегазовой промышленности в Арктическом регионе // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика – регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в Арктическом регионе. 2020. С. 83–87.
28. Маркелов Д.А., Маркелов А.В., Минеева Н.Я., Акользин А.П., Кочуров Б.И., Шаповалов Д.А., Хуторова А.О., Григорьева М.А., Чукмасова Е.А. Нефтяное загрязнение ландшафтов Чечни: распознавание на местности – «Технология с одного взгляда» // Экология урбанизированных технологий. 2018. № 2. С. 52–60.
29. Московченко Д.В. Экогеохимия нефтегазодобывающих районов Западной Сибири / Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т проблем освоения Севера. Новосибирск: Гео, 2013.
30. Московченко Д.В., Артамонова Г.Н., Бабушкин А.Г. Особенности формирования гидрохимических аномалий в районах нефтедобычи на севере Западной Сибири // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2008. № 5. С. 411–419.
31. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г., Убайдулаев А.А. Солевое загрязнение поверхностных вод на нефтяных месторождениях Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 1. С. 91–102.
32. Назаров А. В., Егорова Д. О., Макаренко А. А., Демаков В. А., Плотникова Е. Г. Эколого-микробиологическая оценка грунтов, загрязненных полихлорированными бифенилами // Экология человека, № 3, 2016, С. 3–8. DOI: 10.33396/1728-0869-2016-3-3-8

33. *Одинцова Т.А., Бачурин Б.А., Костарев С.М.* Геохимические маркеры идентификации аквабитумидов нефтяного типа // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 5. С. 293–297.
34. *Пиковский Ю.И., Исмаилов Н.М., Дорохова М.Ф.* Нефтегазовая геоэкология – наука XXI века // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. № 2(13). Т. 10. С. 56–62.
35. *Пиковский Ю.И., Исмаилов Н.М., Дорохова М.Ф.* Основы нефтегазовой геоэкологии: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2020.
36. *Пиковский Ю.И., Солнцева Н.П.* Геохимическая трансформация дерново-подзолистых почв под влиянием потоков нефти // Техногенные потоки вещества в ландшафтах и состояние экосистем. М.: Наука, 1981. С. 149–154.
37. *Полякова Е.В., Гофаров М.Ю.* Возможности подспутникового дистанционного зондирования наземных участков с использованием беспилотного летательного аппарата StopCam // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 61–65.
38. *Санников П.Ю., Андреев Д.Н., Бузмаков С.А.* Выявление и анализ сухостоя при помощи беспилотного летательного аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 103–113. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-103-113.
39. *Сванидзе И.Г., Кремлева Т.А., Соромотин А.В.* Воздействие подземных вод Западно-Сибирского артезианского бассейна на миграцию макро- и микроэлементов малых рек // Вестн. ТюмГУ. 2012. № 12. С. 55–63.
40. *Сванидзе И.Г., Моисеенко Т.И., Якимов А.С., Соромотин А.В.* Воздействие техногенного галогенеза на водосборные ландшафты речных долин и водные системы (на примере юга Тюменской области) // Вод. ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 94–103.
41. *Сегал А.М., Арустамов Э.А., Балкин В.А.* Оценка экологического состояния территории и мониторинг окружающей среды с использованием ГИС технологий // Вестник евразийской науки. Изд.: Мир науки. 2018. С. 1–8.
42. *Середина В.П., Андреева Т.А., Алексеева Т.П., Бурмистрова Т.И., Терещенко Н.Н.* Нефтезагрязненные почвы: свойства и рекультивация. Томск: Изд-во ТПУ, 2006.
43. *Середина В.П., Колесникова Е.В., Кондыков В.А., Непотребный А.И., Огнев С.А.* Особенности влияния нефтяного загрязнения на почвы средней тайги Западной Сибири//Нефтяное хозяйство. 2017. № 5. С. 108–112. DOI: 10.248887/0028-2448-2017-5-108-122.
44. *Середина В.П., Непотребный А.И., Огнев С.А.* Особенности техногенного галогенеза при загрязнении нефтью почв бореального пояса // Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове сборник материалов V Международной научной конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения и экологии почв ТГУ (7–11 сентября 2015 г., г. Томск, Россия) под ред. С.П. Кулижского. Томск: Издательский дом ТГУ, 2015. С. 364–368.
45. *Солнцева Н.П.* Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: МГУ, 1998.
46. *Соромотин А.В.* Воздействие добычи нефти на таежные экосистемы Западной Сибири: монография. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2010.
47. *Фрейберг И.А., Стеценко С.К.* Реакция хвойных растений на пестицидную токсичность в зависимости от видовой принадлежности // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. Т. 96, № 10, 2012. С. 69–71.
48. *Чайкин С.А.* Анализ состояния атмосферного воздуха и поверхностных вод для оценки трансформации экосистем на территории староосвоенных месторождений Пермского края // Географический вестник = Geographical bulletin. 2012. № 3. С. 77–90.
49. *Abad R.M.M., Al-Kindi S.* Effect of disturbance by oil pollution on the diversity and activity of bacterial communities in biological soil crusts from the Sultanate of Oman // Applied Soil Ecology. 2017. Vol. 110. Pp. 88–96.
50. *Álvarez A.M., Carral P., Hernández Z., Al-mendros G.* Hydrocarbon pollution from domestic oil recycling industries in peri-urban soil. Lipid molecular assemblages // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2016. Vol. 4. Pp. 695–703.
51. *Arnold T., De Biasio M., Fritz A., Leitner R.* UAV-based measurement of vegetation indices for environmental monitoring // 7th International Conference on Sensing Technology. 2013. Pp. 704–707.
52. *Bajagain R., Park Y., Jeong S.W.* Feasibility of oxidation-biodegradation serial foam spraying for total petroleum hydrocarbon removal without soil disturbance // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 626. Pp. 1236–1242.
53. *Balogun, A.-L., Yekeen, S.T., Pradhan, B., Wan Yusof, K.B.* Oil spill trajectory modelling and environmental vulnerability mapping using GNOME model and GIS // Environmental Pollution. 2021. Vol. 268. №115812.
54. *Benavente D.* Semi-expendable unmanned aerial vehicle for forest fire suppression // International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires, Forest Fires. 2010. V. 137. Pp. 143–148.
55. *Boloorani A.D., Shorabeh S.N., Samany N.N., Mousivand A., Kazemi Y., Jaafarzadeh N., Zahedi A, Rabbie J.* Vulnerability mapping and risk analysis of sand and dust storms in Ahvaz, IRAN // Environmental Pollution. 2021. Vol. 279, Issue 15. Pp. 1–14.
56. *Borodulina T.S., Polonskii V.I., Vlasova E.S., Shashkova T.L., Grigor'ev Yu.S.* Effect of Oil- Pollution of Water on Slow Fluorescence of the Algae Chlorella vulgaris Beijer and Survival Rate of the Cladoceran Daphnia magna Str. // Contemporary Problems of Ecology. 2011. Vol. 4 (1). Pp. 80–83. DOI:10.1134/S1995425511010139.
57. *Buzmakov S., Egorova D., Gatina E.* Effects of crude oil contamination on soils of the Ural region // Journal of Soils and Sediments. 2018. Vol. 19 (1). Pp. 1–11. DOI: 10.1007/s11368-018-2025-0.

58. Colvin K. A., Lewis C. And Galloway T. S. Current issues confounding the rapid toxicological assessment of oil spills // *Chemosphere*, Vol. 245, 2020, P. 125585. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125585>.
59. Czerniawska-Kusza I. Comparison of the Phytotoxicity microtest and chemical variables for toxicity evaluation of sediments / I. Czerniawska-Kusza, T. Ciesielczuk, G. Kusza, A. Cichon // *Environmental Toxicology*. 2006. Vol. 21(4). Pp. 367–372. DOI 10.1002/tox.20189.
60. Dash J.P., Watt M.S., Pearse G.D., Heaphy M., Dungey H.S. Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. Vol. 131. P. 1–14.
61. Daud R.M., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Aki-menko, Y. Development of ecological regional maximum permissible concentrations of fuel oil in arid soils of south of Russia // *Indian journal of ecology*. Vol. 23(9). Pp. 66–71. 2019. DOI:10.18412/1816-0395-2019-9-66-71.
62. de Smet T., Nikulin A., Romanzo N., Graber N., Dietrich C., Puliaiev A. Successful application of drone-based aeromagnetic surveys to locate legacy oil and gas wells in Cattaraugus county, New York // *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 186, 2021, Number of article 104250. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104250.
63. Ding K., Wu Q., Wei H., Yang W., Sere G., Wang S., Echevarria G., Tang Y., Tao J., Morel J.L., Qiu R. Ecosystem services provided by heavy metal-contaminated soils in China // *Journal of Soils and Sediments*. 2018. Vol.18. Pp. 380–390.
64. Dong B., Feng Z.-K., Yao S., Wang J., Guo J.-C. Aerial-ground-space precision auto-measurement technology in stereo forest surveying // *Journal of Beijing Forestry University*. 2008. Vol. 30. Pp. 173–177.
65. Dubrovskaya E.V., Pozdnyakova N.N., Muratova A.Y., Turkovskaya O.V. Changes in phytotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in the course of microbial degradation // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2016. Vol. 63(1). P. 172–179. <https://doi.org/10.1134/S1021443716010052>.
66. Dunford R., Michel K., Gagnage M., Piégay H., Trémelo M.-L. Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest // *International Journal of Remote Sensing*. 2009. V. 30 (19). P. 4915–4935.
67. Froger C., Ayrault S., Gasperi J., Caupos E., Monvoisin G., Evrard O., Quantin C. Innovative combination of tracing methods to differentiate between legacy and contemporary PAH sources in the atmosphere-soil-river continuum in an urban catchment (Orge River, France) // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 669. Pp. 448–458.
68. Füleky G., Barna S. Biotesting of heavy metal pollution in the soil // *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, Vol. 3(2), 2008, Pp. 93–102.
69. Galalizadeh, S., Karimi, H., Malekmohammadi, B., Sadeghi, A., Shirzadi, S. Environmental risk assessment and mapping of oil installations to Chamshir Dam water basin using GIS and HAZOP method // *International Journal of Risk Assessment and Management*. 2020. Vol. 23. Issue 3–4. Pp. 207–222.
70. Getzin S. Nuske R.S., Wiegand K. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) to Quantify Spatial Gap Patterns in Forests // *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. Pp. 6988–7004.
71. Gini R., Passoni D., Pinto L., Sona G. Use of unmanned aerial systems for multispectral survey and tree classification: A test in a park area of northern Italy // *European Journal of Remote Sensing*. 2014. Vol. 47 (1). P. 251–269.
72. Gomez C., Green D.R. Small unmanned airborne systems to support oil and gas pipeline monitoring and mapping // *Arabian Journal of Geosciences*. 2017. Vol. 10, Iss. 9. Number of Article 202. DOI: 10.1007/s12517-017-2989-x.
73. Gordon G., Stavi I., Shavit U., Rosenzweig R. Oil spill effects on soil hydrophobicity and related properties in a hyper-arid region // *Geoderma*. 2018. Vol. 312. Pp. 114–120.
74. Grifoni M., Rosellini I., Angelini P., Petruzzelli G., Pezzarossa B. The effect of residual hydrocarbons in soil following oil spillages on the growth of Zea mays plants // *Environmental Pollution*. 2020. Part A. 265. P. 114950.
75. Hassani B., Sahebi M., Asiyabi, R. Oil Spill Four-Class Classification Using UAVSAR Polarimetric Data // *Ocean Science Journal*. Vol. 55, Iss. 3, 2020. Pp. 433–443. DOI: 10.1007/s12601-020-0023-9.
76. Heurich M., Ochs T., Andresen T., Schneider T. Object-orientated image analysis for the semi-automatic detection of dead trees following a spruce bark beetle (*Ips typographus*) outbreak // *European Journal of Forest Research*. 2010. Vol. 129 (3). Pp. 313–324.
77. Hewelke E., Szatylowicz J., Hewelke P., Gnadowski T., Aghalarov R. The impact of diesel oil pollution on the hydrophobicity and CO₂ efflux of forest soils // *Water, Air and Soil Pollution*. 2018. Vol. 229. P. 51.
78. Inoue T., Nagai S., Yamashita S., Fadaei H., Ishii R., Okabe K., Taki H., Honda, Y., Kajiwara K., Suzuki R. Unmanned aerial survey of fallen trees in a deciduous broadleaved forest in eastern Japan // *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9 (10). Pp. 1–7.
79. Khatishashvili G., Matchavariani L., Gakhokidze R. Improving phytoremediation of soil polluted with oil hydrocarbons in Georgia // *Soil Remediation and Plants*. 2015. Pp. 547–569.
80. Klemas, V. Coastal and Environmental Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: An Overview // *Journal of Coastal Research*. 2015. Vol. 31. Iss. 5. P. 1260–1267. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00005.1>.
81. Kolesnikov S.I., Gaivoronskii V.G., Rotina E.N., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Assessment of soil tolerance toward contamination with black oil in the south of Russia on the Basis of soil Biological Indices: a model experiment // *Eurasian Soil Science*. 2010. Vol. 43. Pp. 929–934.
82. Kolesnikov S.I., Spivakova (Petrova) N.A., and Kazeev K.Sh. The Effect of Model Soil Contamination with Cr, Cu, Ni, and Pb on the Biological Properties of Soils in the Dry Steppe and Semidesert Regions of South-

- ern Russia // *Eurasian Soil Science*, Vol. 44(9), 2011, Pp. 1001–1007. DOI: 10.1134/S1064229311090055.
83. *Kolesnikov S.I., Zharkova M.G., Kazeev K.S., Kutuzova I.V., Samokhvalova L.S., Naleta E.V., Zubkov D.A.* Ecotoxicity assessment of heavy metals and crude oil based on biological characteristics of chernozem // *Russian Journal of Ecology*. 2014. Vol. 45 (3). Pp. 157–166.
84. *Kondratyeva M.A., Bazukova N.V.* Mapping of soils since its inception to our days (on the example of the Perm region) // *Russian Journal of Applied Ecology*. 2019. Vol. 3 (19). Pp. 28–34.
85. *Launchbury R.* Unmanned aerial vehicles in forestry (Short Survey) // *Forestry Chronicle*. 2014. Vol. 90 (4). Pp. 418–419.
86. *Lehmann J.R.K., Nieberding F., Prinz T., Knoth C.* Analysis of unmanned aerial system-based CIR images in forestry—a new perspective to monitor pest infestation levels // *Forests*. 2015. Vol. 6 (3). Pp. 594–612.
87. *Lisein J., Pierrot-Deseilligny M., Bonnet S., Lejeune P.* A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery // *Forests*. 2013. Vol. 4 (4). Pp. 922–944.
88. *Liste H.H., Prutz I.* Plant Performance, Dioxygenase-Expressing Rhizosphere Bacteria, and Biodegradation of Weathered Hydrocarbons in Contaminated Soil // *Chemosphere*, Vol. 62(9), 2006, Pp. 1411–1420. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.05.018
89. *Margesin R., Hämmerle M., Tschërko D.* Microbial activity and community composition during bioremediation of diesel-oil-contaminated soil: effects of hydrocarbon concentration, fertilizers, and incubation time // *Microbial Ecology*. 2007. Vol. 53 (2). Pp. 259–269
90. *Merino L., Caballero F., Martínez-de-Dios J.R., Maza I., Ollero A.* Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement using Unmanned Aerial Vehicles // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2012. Vol. 65 (1–4). Pp. 533–548.
91. *Mikolasch A., Donath M., Reinhard A., Herzer C., Zayadan B., Urlich T., Schauer F.* Diversity and degradative capabilities of bacteria and fungi isolated from oil-contaminated and hydrocarbon-polluted soils in Kazakhstan // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2019. DOI: 10.1007/s00253-019-10032-9.
92. *Minasny B., Finke P., Stockmann U., Vanwalleghem T., McBratney A.B.* Resolving the integral connection between pedogenesis and landscape evolution // *Earth-Science Reviews*. Vol. 150. Pp. 102–120.
93. *Negara T., Jaya I., Kusmana C., Mansur I., Santi N.* Drone image-based parameters for assessing the vegetation condition the reclamation success in post-mining oil exploration // *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)* Vol. 19, Iss.1, 2021, Pp. 105–114. DOI: 10.12928/TELKOMNIKA.V19I1.16663.
94. *Nikolaeva O.V., Terekhova V.A.* Improvement of laboratory phytotest for the ecological evaluation of soils // *Eurasian Soil Science*, Vol.50(9), 2017, Pp. 1105–1114. <https://doi.org/10.1134/S1064229317090058>.
95. *Ondráček, J., Vaněk, O., Pěchouček, M.* Monitoring oil pipeline infrastructures with multiple unmanned aerial vehicles // *Advances in Practical Applications of Heterogeneous Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection*. Vol. 8473 LNAI, 2014, Pp. 219–230. DOI: 10.1007/978-3-319-07551-8_19.
96. *Paneque-Gálvez J., McCall M.K., Napoletano B.M., Wich S.A., Koh L.P.* Small drones for community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential in tropical areas // *Forests*. 2014. Vol. 5 (6). Pp. 1481–1507.
97. *Pierzchala M., Talbot B., Astrup R.* Estimating soil displacement from timber extraction trails in steep terrain: Application of an unmanned aircraft for 3D modeling // *Forests*. 2014. Vol. 5 (6). Pp. 1212–1223.
98. *Pinedo J., Ibáñez R., Lijzen J.P.A., Irabien Á.* Assessment of soil pollution based on total petroleum hydrocarbons and individual oil substances // *Journal of Environmental Management*. 2013. 2013130. Pp. 72–79.
99. *Qin W., Zhu Y., Fan F., Wang Y., Liu X., Ding A., Dou J.* Biodegradation of benzo(a)pyrene by *Microbacterium* sp. strain under denitrification: Degradation pathway and effects of limiting electron acceptors or carbon source // *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 121, 2017, Pp. 131–138. DOI: 10.1016/j.bej.2017.02.001.
100. *Révész F., Figueroa-Gonzalez P.A., Probst A.J., Kriszt B., Banerjee S., Szoboszlai S., Maróti G., Tánácsics A.* Microaerobic conditions caused the overwhelming dominance of *Acinetobacter* spp. and the marginalization of *Rhodococcus* spp. in diesel fuel/crude oil mixture-amended enrichment cultures // *Archives of Microbiology*. 2020. V. 202. pp. 329–342.
101. *Salami E., Barrado C., Pastor E.* UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas // *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6 (11). Pp. 11051–11081.
102. *Santos I.C., Martin M.S., Reyes M.L., Carlton Jr D.D., Stigler-Granados P., Valerio M.A., Whitworth K.W., Hildenbrand Z.L., Schug K.A.* Exploring the links between groundwater quality and bacterial communities near oil and gas extraction activities // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 618. Pp. 165–173.
103. *Schreyer J., Lakes T.* Remote sensing-based approaches for modeling 3D vegetation information in urban areas // *14th International Conference on Computational Science and Its Applications. ICCSA*. 2014. Pp. 116–120.
104. *Shaoping K., Zhiwei D., Bingchen W, Huihui W, Jialiang L., Hongbo S.* Changes of sensitive microbial community in oil polluted soil in the coastal area in Shandong, China for eco-restoration // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 207. Pp. 111551.
105. *Shashkova T. L. and Grigor'ev Yu. S.* Impact of Heavy Metals on the Trophic Activity of *Daphnia* Depending on Feeding Conditions and Age of Crustaceans // *Contemporary Problems of Ecology*, Vol. 6(6), 2013. Pp. 662–666. DOI: 10.1134/S1995425513060103
106. *Shen W., Zhu N., Cui J., Wang H., Dang Z., Wu P., Luo Y. and Shi C.* Ecotoxicity monitoring and bioindicator screening of oil-contaminated soil during bioremediation // *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, Vol. 124. Pp. 120–128. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.10.005
107. *Shulaev N. S., Pryanichnikova V.V., Kadyrov R.R., Bykovsky N.A., Damineva R.M. and Ovsyannikova I.V.* Phytotoxic properties of electrically-cleaned oil-

contaminated soils (the use of *Lepidium sativum* L. biotest) // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 862 (2020) 062021 doi:10.1088/1757-899X/862/6/062021.

108. *Sushkova S.N., Minkina T.M., Mandzhieva S.S. and Tjurina I.G.* Elaboration and Approbation of Methods for Benzo[a]pyrene Extraction from Soils for Monitoring of the Ecological State in Technogenic Landscapes // *World Applied Sciences Journal*, Vol. 25(10), 2013, P. 1432–1437. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.25.10.11237.

109. *Trofimov I., Pavliukh L., Novakivska T. and Bondarenko D.* Assessment of phytotoxicity of mixed aviation fuels using of plant testers // *International independent scientific journal*, Vol. 11, 2020, P. 9–17.

110. *Vasconcelos R., Lima A., Lentini C., Miranda G., Mendonça L., Silva, M., Cambuí E., Lopes J. and Porsani M.* Oil spill detection and mapping: A 50-year bibliometric analysis // *Remote Sensing*. Volume 12, Issue 21, 2020, Number of Article 3647, Pages 1–18. doi:10.3390/rs12213647.

111. *Von Wahl N., Heinen S., Essen H., Kruell W., Tobera R., Willms I.* An integrated approach for early forest fire detection and verification using optical smoke, gas and microwave sensors // *International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires, Forest Fires*. 2010. Vol. 137. P. 97–106.

112. *Wanasinghe T., Gosine R., De Silva O., Mann G., James L., Warran P.* Unmanned aerial systems for the oil and gas industry: Overview, applications, and challenges. *IEEE Access*. Vol. 8, 2020. Pp. 166980–166997. DOI 10.1109/ACCESS.2020.3020593.

113. *Wang S., Mu L., Qi M., Yu Z., Yao Z., Zhao E.* Quantitative risk assessment of storm surge using GIS techniques and open data: A case study of Daya Bay Zone, China // *Journal of Environmental Management* 2021. Vol. 289, P. 1–16.

114. *Wang S., Mu L., Qi M., Yu Z., Yao Z., Zhao E.* Assessment of ecological stress caused by maritime vessels based on a comprehensive model using AIS data: Case study of the Bohai Sea, China // *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 126, P. 1–16.

115. *Wubalem A.* Landslide susceptibility mapping using statistical methods in Uatzau catchment area, northwestern Ethiopia // *Geoenvironmental Disasters*. 2021. Vol.8.Issue 1. P. 1–21.

116. *Xing X., Qi S., Zhang J., Wu Ch., Zhang Y., Yang D., Odhiambo J.O.J.* Spatial distribution and source diagnosis of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Chengdu Economic Region, Sichuan Province, western China // *Journal of Geochemical Exploration*. 2011. Vol.110. Pp. 146–154.

117. *Zhang J., Dai J., Chen H., Du X., Wang W., Wang R.* Petroleum contamination in groundwater/air and its effects on farmland soil in the outskirts of an industrial city in China // *Journal of Geochemical Exploration*. Vol. 118. Pp. 19–29.

118. *Zhu, L., Zhang, C., Wang, J. and Du, Z.* The acute toxic effects of 1-alkyl-3-methylimidazolium nitrate ionic liquids on *Chlorella vulgaris* and *Daphnia magna* //

Environmental Pollution. Vol. 229, 2017. Pp. 887–895. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.055>.

References

1. *Abramyan, S.* (2010) Kontsepsiya sozdaniya GIS-tekhnologiy dlya ekologicheskogo monitoring. *Internet-vestnik VolgGASU. Ser. Stroit. Informatika*. Vol. 4 (11). Pp. 1–5. (in Russian).

2. *Aleshko, R., Alekseyeva, A., Shoshina, K., Bogdanov, P., Gur'yev, A.,* (2017) Razrabotka metodiki obnoveniya informatsii o lesnoy territorii s ispol'zovaniyem sputnikovykh snimkov i nebol'shikh BPLA. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Vol. 14 (5) Pp. 87–99. (in Russian) DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99.

3. *Arzamazova, A., Kinzhaev, R. and Trofimov, S.,* (2016) Application of spring wheat in phytotesting of oil-polluted soils. *Problemy agrokhimii i ekologii*. Vol. 2. Pp. 47–51. (in Russian).

4. *Babushkin, A., Moskovchenko, D., Pikunov, S.* (2007) *Gidrokhimicheskii monitoring poverkhnostnykh vod Khanty-Mansiiskogo avtonomnogo okruga – Yugry* [Hydrochemical monitoring of the surface water in Khanty-Mansi Autonomous Area – Yugra]. Novosibirsk, Nauka Publ. (in Russian).

5. *Bachurin, B. A., Odintsova, T. A.* (2005) Problems of diagnostics and control of oil pollution of natural geosystems. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. Vol. 9-10. Pp. 79–84. (in Russian).

6. *Bachurin, B. A., Odintsova, T. A., Borisov, A. A.* (2009) To the method of the identification of the source of the oil pollution of geological environment. *Mining informational and analytical bulletin*. Vol. 10. Pp. 291–298. (in Russian).

7. *Binenko, V., Chernook, I., Ivanov, R.* (2010) *Ekologicheskaya bezopasnost' dobychi i transportirovki uglevodorodov na ostrove Sakhalin na osnove ispol'zovaniya aerometodov i GIS-tekhnologiy. Regional'naya ekologiya*, Vol. 3 (29). Pp. 18–23. (in Russian).

8. *Brodskii, E., Savchuk, S.* (1980) Determination of petroleum products in the environment. *Journal of Analytical Chemistry*. Vol. 53 (12). Pp. 1070–1082. (in Russian)

9. *Buzmakov, S.* (2012) Anthropogenic transformation of the environment. *Geograficheskiy vestnik*. Vol. 4 (23). Pp. 46–50 (in Russian).

10. *Buzmakov, S., Kostarev, S.* (2003) *Tekhnogennye izmeneniya komponentov prirodnoi sredy v nefte dobyvayushchikh raionakh Permskoi oblasti* [Technogenic changes in the components of the natural environment in the oil-producing regions of the Perm region]. Perm, PSU. (in Russian).

11. *Buzmakov, S., Andreev, D. and Sannikov, P.* (2015) Applying of unmanned aerial vehicle in the study of forest conditions. *Geology, geography and global energy*. Vol. 4. Pp. 60–69. (in Russian).

12. *Daud, R. and Kolesnikov, S.,* (2018) The effect of gasoline pollution on the phytotoxicity of soils in arid ecosystems in southern Russia. *Sbornik materialov konferentsii «Aktual'nyye problemy ekologii i prirodopol'zovaniya»*. Pp. 29–31. (in Russian).

13. *Daoud, R., Kolesnikov, S., Kuzina, A., Kazeev, K. and Akimenko, Yu.* (2019) Development of regional

- maximum permissible concentrations of oil in the soils of arid ecosystems in the south of Russia. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. Vol. 23 (9). Pp. 66–70. (in Russian) DOI: 10.18412/1816-0395-2019-09-66-70.
14. Drugov, Ju. S., Rodin, A. A. (2000) *Ekologicheskie analizy pri razlivah nefiti i nefteproduktov. Prakticheskoe rukovodstvo* [Ecological analysis for oil spills of petroleum products]. St. Petersburg, Anatolia. (In Russian).
15. Eremchenko, O.Z., Moskvina, N.V., Mitrakova, N.V., Kolbik, A.E., Pakhorukov, I.V. (2019) Assessment of the ecological condition of salted, acid and alkaline soils by the phytotesting method. *Vestnik Permskogo universiteta. Biologiya*. Vol. 1. Pp. 63–71. (in Russian). DOI: 10.17072/1994-9952-2019-1-63-71.
16. Zilberman, M.V., Poroshina, E.A. and Zyryanova, E.A., (2005) *Biotestirovaniye pochv, zagryaznennykh nef'tyu i nefteproduktami* [Biotesting of soils contaminated with oil and oil products], Perm, 111 p. (in Russian).
17. Ilarionov, S.A., Nazarov, A.V. and Kalachnikova, I.G., (2003) The role of micromycetes in the phytotoxicity of crude oil-polluted soils. *Russian Journal of Ecology*. Vol. 5. Pp. 341–346. (in Russian).
18. Kazantseva, M. N., Svanidze, I. G. (2014) The structure and biodiversity of meadow phytocenoses of the valley of the Aremzyanka river under anthropogenetic salinization of soils. *Environmental monitoring and biodiversity*. Vol. 1. Pp. 6–12. (in Russian).
19. Kazantseva, M. N., Svanidze, I. G. (2016) Transformation of Forest Phytocenosis in Southern Taiga of West Siberia under the Action of Mineralized Formation Waters. Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology. Vol. 2 (3). Pp. 71–81. Available from: doi: 10.21684/2411-7927-2016-2-3-71-81.
20. Kalantayevskiy, Yu., Aleksandrova, A., Kсандopulo, S., Levchuk, A., Solov'yeva, Zh. (2013) *Primeneniye geograficheskikh informatsionnykh sistem dlya ekologicheskogo monitoringa v neftegazovom komplekse. Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. Pp 1–10. (in Russian).
21. Kireeva, N. A., Kabirov, T.R. and Dubovik, I. E., (2007) Complex biotesting of oil-polluted soils. *Theoretical and applied ecology*. Vol. 1. Pp. 12–17. (in Russian).
22. Kiselyov, M.V. and Basharina, M.V., (2020) Determination of soil toxicity purified from oil contamination by biological preparations in the conditions of the north-west of the Russian Federation. *Izvesniya Saint-petersburg State agrarian university*. Vol. 59. Pp. 64–69. (in Russian) DOI: 10.24411/2078-1318-2020-12064.
23. Kolesnikov, S.I., Daoud, R.M., Kuzina, A.A., Kazeev, K.Sh. and Akimenko, Y.V., (2019) Regional standards of mazut content in arid soils of south Russia. *Environmental protection in oil and gas complex*. Vol. 3(288). Pp. 25–29. (in Russian) DOI: 10.33285/2411-7013-2019-3(288)-25-29.
24. Kuznetsov, A. N., Fedorov, Yu. A., Zagranichnyi, K. A. (2013) Oil pollution of the Black sea coast in the area of the city of Novorossiysk (result of long-term investigations). *Bulletin of higher education institutes. North Caucasus region. Natural sciences*. Vol. 1. Pp. 71–77. (in Russian).
25. Kuznetsov, A. N., Fedorov, Yu. A. (2011) *Neftyanoe zagryaznenie v vodnykh ekosistemakh. Zakonomernosti estestvennoi transformatsii* [Oil pollution in aquatic ecosystems. Regularities of natural transformation]. Saarbrucken, Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG. (in Russian).
26. Kuznetsov, A.N., Fedorov, Yu.A. (2014) Oil components in the mouth area of the Don river and in the sea of Azov: results of many-year studies. *Water Resources*. Vol. 41(1). Pp. 49–59. (in Russian).
27. Kurakina, N., Myshko, R. (2020) GIS otsenki ekologicheskikh vozdeystviya neftegazovoy promyshlennosti v Arkticheskom regione. *Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy. Arktika – region strategicheskikh interesov: pravovaya politika i sovremennyye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti v Arkticheskom regione*. Pp. 83–87. (in Russian).
28. Markelov, D., Markelov, A., Mineyeva, N., Akol'zin, A., Kochurov, B., Shapovalov, D., Khutorova, A., Grigor'yeva, M., Chukmasova, Ye. (2018) *Neftyanoye zagryazneniye landshaftov Chechni: raspoznavaniye na mestnosti – «Tekhnologiya s odnogo vzglyada»*. *Ekologiya urbanizirovannykh tekhnologiy*, Vol. 2. Pp. 52–60. (in Russian).
29. Moskovchenko, D. V. (2013) *Ekogeokhimiya neftegazodobyvayushchikh raionov Zapadnoi Sibiri* [Ekogeochimistry of oil and gas producing regions of Western Siberia]. Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of the problems of Northern development. Novosibirsk, Geo. (in Russian).
30. Moskovchenko, D.V., Artamonov, G.N., Babushkin, A.G. (2008) Features of formation of hydrochemical anomalies in the oil-producing regions in the north of Western Siberia. *Environmental Geoscience*. Vol. 5. Pp. 411–419. (in Russian).
31. Moskovchenko, D.V., Babushkin, A.G., Ubaidulaev, A.A. (2017) Salt pollution of surface water in oil fields of Khanty-Mansi autonomous area-Yugra. *Water Resources*. Vol. 44 (1). Pp. 91–102. (in Russian).
32. Nazarov, A.V., Egorova, D.O., Makarenko, A.A., Demakov, V.A. and Plotnikova, E.G., (2016) Ecological-microbiological assessment of polychlorinated biphenyl-contaminated grounds. *Human ecology*. Vol. 3. Pp. 3–8. (in Russian) DOI: 10.33396/1728-0869-2016-3-3-8.
33. Odintsova, T.A., Bachurin, B.A., Kostarev, S.M. (2015) Geochemical identification markers of naphthides aquabituens. *Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. Vol. 17 (5). Pp. 293–297. (in Russian).
34. Pikovskii, Yu. I., Ismailov, N.M., Dorohova, M.F. (2014) Oil-and-gas geocology – a science of the 21-st century. *Geopolitics and Ecogeodynamics of regions*. Vol. 10 (2). Pp. 56–62. (in Russian).
35. Pikovskii, Yu.I., Ismailov, N.M., Dorokhova, M.F. (2020) *Osnovy neftegazovoi geokologii* [Fundamentals of oil and gas Geocology]. Moscow, INFRA-M. (in Russian).
36. Pikovskii, Yu. I., Solntseva, N. P. (1981) Geochemical transformation of sod-podzolic soils under the influence of oil flows. In: Glazovskaya, M.A. (ed.) *Technogenic flows of substances in landscapes and their ef-*

- fects on ecosystems. Moscow, Nauka. Pp. 149–154. (in Russian).
37. Polyakova, Ye., Gofarov, M. (2011) Vozmozhnosti podsputnikovogo distantsionnogo zondirovaniya nazemnykh uchastkov s ispol'zovaniyem bespilotnogo letatel'nogo apparata CropCam. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Vol. 8(4). Pp. 61–65. (in Russian).
38. Sannikov, P., Andreev, D. and Buzmakov, S., (2018) Identification and analysis of deadwood using an unmanned aerial vehicle. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Vol. 15(3). Pp. 103–113. (in Russian) DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-103-113.
39. Svanidze, I.G., Moiseenko, T.I., Yakimov, A.S., Soromotin, A.V. (2014) Impact of tecnogenic halogenesis on water catchment landscapes of river valleys and water systems (by the example of the south of the Tyumen region). *Water Resources*. Vol. 41 (1). Pp. 94–103. (in Russian).
40. Svanidze, I.G., Kremleva, T.A., Soromotin, A.V. (2012) Influence of the artesian basin groundwater of West Siberia on the migration of macroand microelements in minor rivers. *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*. Vol. 12. Pp. 55–63. (in Russian).
41. Segal, A., Arustamov, E., Balkin, V. (2018) Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya territorii i monitoring okruzhayushchey srede s ispol'zovaniyem GIS tekhnologiy. *Vestnik yevraziyskoy nauki. Izd.: Mir nauki*. Pp. 1–8. (in Russian).
42. Seredina, V.P., Andreeva, T.A., Alekseeva, T.P., Burmistrova, T.I., Tereshchenko, N.N. (2006) Neftezagryaznennyye pochvy: svoystva i rekul'tivatsiya [Oil-contaminated soils: properties and reclamation]. Tomsk, TPU Publishing House. (in Russian).
43. Seredina, V. P., Kolesnikova, E. V., Kondykov, V. A., Nepotrebny, A. I. and Ognev, S. A. (2017) Peculiarities of oil pollution influence on soils of middle taiga in Western Siberia. *Oil Industry*. Vol. 5. Pp. 108–112. Available from: doi: 10.248887/0028-2448-2017-5-108-122. (in Russian).
44. Seredina, V.P., Nepotrebnyi, A.I., Ognev, S.A. (2015) Features of technogenic halogenesis during oil pollution of soils of the boreal belt. In: Kulizhsky, S.P. (ed.) Reflection of bio-, geo-, anthropospheric interactions in soils and soil cover, collection of materials of the V International Scientific Conference dedicated to the 85th anniversary of the Department of Soil Science and Soil Ecology of TSU (7–11 September, 2015, Tomsk, Russia). Tomsk, TSU Publishing House. Pp. 364–368. (in Russian).
45. Solntseva, N. P. (1998) Dobycha nefi i geokhimiya prirodnykh landshaftov [Oil Extraction and Geochemistry of Natural Landscapes]. Moscow, Moscow State University Press. (in Russian).
46. Soromotin, A.V. (2010) Vozdeistvie dobychi nefi na taezhnye ekosistemy Zapadnoi sibiri [Impact of oil production on taiga ecosystems of Western Siberia]. Tyumen, Tyumen state university Publ. (in Russian).
47. Freiberg, I.A. and Stetsenko, S.K., (2012) Response of coniferous plants to pesticide toxicity depending on the species. *Vestnik altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. Vol. 96 (10). Pp. 69–71. (in Russian).
48. Chaikin, S. A. (2012) Analiz sostoyaniya atmosfernogo vozdukha i poverkhnostnykh vod dlya otsenki transformatsii ekosistem na territorii staroosvoennykh mestorozhdenii Permskogo kraja [Analysis of the state of atmospheric air and surface waters for assessing the transformation of ecosystems in the territory of old-developed fields of the Perm region]. *Geographical bulletin*. Vol. 3. Pp. 77–90. (in Russian).
49. Abed, R. and Al-Kindi, S., 2017. Effect of disturbance by oil pollution on the diversity and activity of bacterial communities in biological soil crusts from the Sultanate of Oman. *Applied Soil Ecology*, Vol. 110. Pp.88–96. DOI: 10.1016/j.apsoil.2016.10.009.
50. Álvarez, A., Carral, P., Hernández, Z. and Al-mendros, G., 2016. Hydrocarbon pollution from domestic oil recycling industries in peri-urban soils. Lipid molecular assemblages. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 4(1), Pp. 695–703. DOI: 10.1016/j.jece.2015.12.017.
51. Arnold, T., De Biasio, M., Fritz, A., Leitner, R. (2013) UAV-based measurement of vegetation indices for environmental monitoring. *7th International Conference on Sensing Technology*. Pp. 704–707.
52. Bajagain, R., Park, Y. and Jeong, S., 2018. Feasibility of oxidation-biodegradation serial foam spraying for total petroleum hydrocarbon removal without soil disturbance. *Science of The Total Environment*, Vol. 626. Pp.1236–1242. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.212.
53. Balogun, A., Yekeen, S., Pradhan, B. and Wan Yusof, K., 2021. Oil spill trajectory modelling and environmental vulnerability mapping using GNOME model and GIS. *Environmental Pollution*, Vol. 268. P.115812. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115812.
54. Benavente, D. (2010) Semi-expendable unmanned aerial vehicle for forest fire suppression. *International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires, Forest Fires*. Vol. 137. Pp. 143–148.
55. Bolorani, A., Shorabeh, S., Neysani Samany, N., Mousivand, A., Kazemi, Y., Jaafarzadeh, N., Zahedi, A. and Rabiei, J., 2021. Vulnerability mapping and risk analysis of sand and dust storms in Ahvaz, IRAN. *Environmental Pollution*. Vol. 279. P.116859. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116859.
56. Borodulina, T., Polonskiy, V., Vlasova, E., Shashkova, T. and Grigor'ev, Y., (2011). Effect of oil-pollution of water on delayed fluorescence of the algae *Chlorella vulgaris* Beijer and survival rate of the cladoceran *Daphnia magna* Str. *Contemporary Problems of Ecology*. 4(1), pp. 80–83. DOI: 10.1134/S1995425511010139
57. Buzmakov, S., Egorova, D. and Gatina, E., 2018. Effects of crude oil contamination on soils of the Ural region. *Journal of Soils and Sediments*. Vol. 19(1). Pp.38–48. DOI: 10.1007/s11368-018-2025-0.
58. Colvin, K., Lewis, C. and Galloway, T., (2020). Current issues confounding the rapid toxicological assessment of oil spills. *Chemosphere*. Vol. 245. P. 125585. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125585.
59. Czerniawska-Kusza, I., Ciesielczuk, T., Kusza, G. and Cichoń, A., (2006). Comparison of the Phytotoxkit

- microbiotest and chemical variables for toxicity evaluation of sediments. *Environmental Toxicology*. Vol. 21(4). Pp. 367–372. DOI 10.1002/tox.20189.
60. Daoud, R., Kolesnikov, S., Kuzina, A., Kaseev, K. and Akimenko, Y., 2019. Development of Regional Maximum Permissible Concentrations of Oil in the Soils of Arid Ecosystems in the South of Russia. *Ecology and Industry of Russia*. Vol. 23(9). Pp. 66–71. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-9-66-71.
61. Dash, J., Watt, M., Pearse, G., Heaphy, M. and Dungey, H., 2017. Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 131. Pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.007>.
62. de Smet, T., Nikulin, A., Romanzo, N., Graber, N., Dietrich, C. and Puliaiev, A., 2021. Successful application of drone-based aeromagnetic surveys to locate legacy oil and gas wells in Cattaraugus county, New York. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 186. P. 104250. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104250.
63. Ding, K., Wu, Q., Wei, H., Yang, W., Séré, G., Wang, S., Echevarria, G., Tang, Y., Tao, J., Morel, J. and Qiu, R., 2016. Ecosystem services provided by heavy metal-contaminated soils in China. *Journal of Soils and Sediments*. Vol. 18(2). Pp.380–390. DOI: 10.1007/s11368-016-1547-6.
64. Dong, B., Feng, Z.-K., Yao, S., Wang, J., Guo, J.-C. (2008) Aerial-ground-space precision auto-measurement technology in stereo forest surveying. *Journal of Beijing Forestry University*. Vol. 30. Pp. 173–177.
65. Dubrovskaya, E., Pozdnyakova, N., Muratova, A. and Turkovskaya, O., 2016. Changes in phytotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in the course of microbial degradation. *Russian Journal of Plant Physiology*, Vol. 63(1). Pp. 172–179. <https://doi.org/10.1134/S1021443716010052>.
66. Dunford, R., Michel, K., Gagnage, M., Piégay, H. and Trémelo, M., 2009. Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 30(19). Pp. 4915–4935. DOI: 10.1080/01431160903023025.
67. Froger, C., Ayrault, S., Gasperi, J., Caupos, E., Monvoisin, G., Evrard, O. and Quantin, C., 2019. Innovative combination of tracing methods to differentiate between legacy and contemporary PAH sources in the atmosphere-soil-river continuum in an urban catchment (Orge River, France). *Science of The Total Environment*, Vol. 669. Pp. 448–458. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.150.
68. Füleky, G., Barna, S. 2008. Biotesting of heavy metal pollution in the soil. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, Vol. 3(2). Pp. 93–102.
69. Galalizadeh, S., Karimi, H., Malekmohammadi, B., Sadeghi, A. and Shirzadi, S., 2020. Environmental risk assessment and mapping of oil installations to Chamshir Dam water basin using GIS and HAZOP method. *International Journal of Risk Assessment and Management*. Vol. 23(3/4). P. 207. DOI:10.1504/ijram.2020.114358.
70. Getzin, S., Nuske, R. and Wiegand, K., 2014. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) to Quantify Spatial Gap Patterns in Forests. *Remote Sensing*. Vol. 6(8), Pp. 6988–7004. DOI: 10.3390/rs6086988.
71. Gini, R., Passoni, D., Pinto, L. and Sona, G., 2014. Use of Unmanned Aerial Systems for multispectral survey and tree classification: a test in a park area of northern Italy. *European Journal of Remote Sensing*, Vol. 47(1). Pp.251–269. DOI: 10.5721/eujrs20144716.
72. Gómez, C. and Green, D., 2017. Small unmanned airborne systems to support oil and gas pipeline monitoring and mapping. *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 10(9). DOI: 10.1007/s12517-017-2989-x.
73. Gordon, G., Stavi, I., Shavit, U. and Rosenzweig, R., 2018. Oil spill effects on soil hydrophobicity and related properties in a hyper-arid region. *Geoderma*. Vol. 312. Pp. 114–120. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.10.008.
74. Grifoni, M., Rosellini, I., Angelini, P., Petruzzelli, G. and Pezzarossa, B., 2020. The effect of residual hydrocarbons in soil following oil spillages on the growth of Zea mays plants. *Environmental Pollution*. Vol. 265. DOI: p.114950.10.1016/j.envpol.2020.114950.
75. Hassani, B., Sahebi, M. and Asiyabi, R., 2020. Oil Spill Four-Class Classification Using UAVSAR Polarimetric Data. *Ocean Science Journal*. Vol. 55(3). Pp. 433–443. DOI: 10.1007/s12601-020-0023-9.
76. Heurich, M., Ochs, T., Andresen, T. and Schneider, T., 2009. Object-orientated image analysis for the semi-automatic detection of dead trees following a spruce bark beetle (*Ips typographus*) outbreak. *European Journal of Forest Research*. Vol. 129(3). Pp. 313–324. DOI: 10.1007/s10342-009-0331-1.
77. Hewelke, E., Szatyłowicz, J., Hewelke, P., Gnатовski, T. and Aghalarov, R., 2018. The Impact of Diesel Oil Pollution on the Hydrophobicity and CO2 Efflux of Forest Soils. *Water, Air, & Soil Pollution*. Vol. 229(2). DOI: 10.1007/s11270-018-3720-6.
78. Inoue, T., Nagai, S., Yamashita, S., Fadaei, H., Ishii, R., Okabe, K., Taki, H., Honda, Y., Kajiwara, K. and Suzuki, R., 2014. Unmanned Aerial Survey of Fallen Trees in a Deciduous Broadleaved Forest in Eastern Japan. *PLoS ONE*, Vol. 9(10). P. 109881. DOI: 10.1371/journal.pone.0109881.
79. Khatishashvili, G., Matchavariani, L., Gakhokidze, R. 2015. Improving phytoremediation of soil polluted with oil hydrocarbons in Georgia. *Soil Remediation and Plants*. Pp. 547–569.
80. Klemas, V., 2015. Coastal and Environmental Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. *Journal of Coastal Research*. Vol. 315. Pp. 1260–1267. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00005.1>.
81. Kolesnikov, S., Gaivoronskii, V., Rotina, E., Kazeev, K. and Val'kov, V., 2010. Assessment of soil tolerance toward contamination with black oil in the south of Russia on the basis of soil biological indices: A model experiment. *Eurasian Soil Science*. Vol. 43(8). Pp.929–934. DOI: 10.1134/s1064229310080107.
82. Kolesnikov, S.I., Spivakova, N.A., and Kazeev, K.Sh., 2011. The Effect of Model Soil Contamination with Cr, Cu, Ni, and Pb on the Biological Properties of Soils in the Dry Steppe and Semidesert Regions of South-

- ern Russia, *Eurasian Soil Science*, Vol. 44(9), 2011. Pp. 1001–1007. DOI: 10.1134/S1064229311090055.
83. Kolesnikov, S., Zharkova, M., Kazeev, K., Kutuzova, I., Samokhvalova, L., Naleta, E. and Zubkov, D., 2014. Ecotoxicity assessment of heavy metals and crude oil based on biological characteristics of chernozem. *Russian Journal of Ecology*. Vol. 45(3). Pp.157–166. DOI: 10.1134/s1067413614030059.
84. Kondratyeva, M., Bazukova, N. (2019) Mapping of soils since its inception to our days (on the example of the Perm region). *Russian Journal of Applied Ecology*. Vol. 3(19). Pp. 28–34.
85. Launchbury, R., 2014. Unmanned Aerial Vehicles in Forestry. *The Forestry Chronicle*. Vol. 90(04). Pp. 418–420. DOI: 10.5558/tfc2014-086
86. Lehmann, J., Nieberding, F., Prinz, T. and Knoth, C., 2015. Analysis of Unmanned Aerial System-Based CIR Images in Forestry—A New Perspective to Monitor Pest Infestation Levels. *Forests*. Vol. 6(12). Pp. 594–612. DOI: 10.3390/f6030594.
87. Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S. and Lejeune, P., 2013. A Photogrammetric Workflow for the Creation of a Forest Canopy Height Model from Small Unmanned Aerial System Imagery. *Forests*. Vol. 4(4). Pp. 922–944. DOI: 10.3390/f4040922.
88. Liste, H. and Prutz, I., 2006. Plant performance, dioxigenase-expressing rhizosphere bacteria, and biodegradation of weathered hydrocarbons in contaminated soil. *Chemosphere*. Vol. 62(9). Pp. 1411–1420. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.05.018.
89. Margesin, R., Hämmerle, M. and Tschерko, D., 2007. Microbial Activity and Community Composition during Bioremediation of Diesel-Oil-Contaminated Soil: Effects of Hydrocarbon Concentration, Fertilizers, and Incubation Time. *Microbial Ecology*. Vol. 53(2). Pp. 259–269. DOI: 10.1007/s00248-006-9136-7.
90. Merino, L., Caballero, F., Martínez-de-Dios, J.R., Maza, I., Ollero, A. (2012) Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement using Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. Vol. 65(1–4). Pp. 533–548.
91. Mikolasch, A., Donath, M., Reinhard, A., Herzer, C., Zayadan, B., Ulrich, T. and Schauer, F., 2019. Diversity and degradative capabilities of bacteria and fungi isolated from oil-contaminated and hydrocarbon-polluted soils in Kazakhstan. *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol. 103(17). Pp. 7261–7274. DOI: 10.1007/s00253-019-10032-9.
92. Minasny, B., Finke, P., Stockmann, U., Vanwalleghe, T. and McBratney, A., 2015. Resolving the integral connection between pedogenesis and landscape evolution. *Earth-Science Reviews*. Vol. 150. Pp. 102–120. DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.07.004.
93. Negara, T., Jaya, I., Kusmana, C., Mansur, I. and Santi, N., 2021. Drone image-based parameters for assessing the vegetation condition the reclamation success in post-mining oil exploration. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. Vol. 19(1). P. 105. DOI: 10.12928/TELKOMNIKA.V19I1.16663.
94. Nikolaeva, O. and Terekhova, V., 2017. Improvement of laboratory phytotest for the ecological evaluation of soils. *Eurasian Soil Science*. Vol. 50(9). Pp. 1105–1114. <https://doi.org/10.1134/S1064229317090058>.
95. Ondráček, J., Vaněk, O. and Pěchouček, M., 2014. Monitoring Oil Pipeline Infrastructures with Multiple Unmanned Aerial Vehicles. *Advances in Practical Applications of Heterogeneous Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection*. Pp. 219–230. DOI: 10.1007/978-3-319-07551-8_19.
96. Paneque-Gálvez, J., McCall, M., Napoletano, B., Wich, S. and Koh, L., 2014. Small Drones for Community-Based Forest Monitoring: An Assessment of Their Feasibility and Potential in Tropical Areas. *Forests*. Vol. 5(6). Pp. 1481–1507. DOI: 10.3390/f5061481.
97. Pierzchała, M., Talbot, B. and Astrup, R., 2014. Estimating Soil Displacement from Timber Extraction Trails in Steep Terrain: Application of an Unmanned Aircraft for 3D Modelling. *Forests*. Vol. 5(6). Pp.1212–1223. DOI: 10.3390/f5061212.
98. Pinedo, J., Ibáñez, R., Lijzen, J. and Irabien, Á., 2013. Assessment of soil pollution based on total petroleum hydrocarbons and individual oil substances. *Journal of Environmental Management*. Vol. 130. Pp.72–79. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.08.048.
99. Qin, W., Zhu, Y., Fan, F., Wang, Y., Liu, X., Ding, A., Dou, J., 2017. Biodegradation of benzo(a)pyrene by Microbacterium sp. strain under denitrification: Degradation pathway and effects of limiting electron acceptors or carbon source. *Biochemical Engineering Journal*. Vol. 121. Pp. 131–138. DOI: 10.1016/j.bej.2017.02.001.
100. Révész, F., Figueroa-Gonzalez, P., Probst, A., Kriszt, B., Banerjee, S., Szoboszlai, S., Maróti, G. and Táncsics, A., 2019. Microaerobic conditions caused the overwhelming dominance of *Acinetobacter* spp. and the marginalization of *Rhodococcus* spp. in diesel fuel/crude oil mixture-amended enrichment cultures. *Archives of Microbiology*. Vol. 202(2). Pp.329–342. DOI: 10.1007/s00203-019-01749-2.
101. Salami, E., Barrado, C. and Pastor, E., 2014. UAV Flight Experiments Applied to the Remote Sensing of Vegetated Areas. *Remote Sensing*. Vol. 6(11). Pp. 11051–11081. DOI: 10.3390/rs6111051.
102. Santos, I., Martin, M., Reyes, M., Carlton, D., Stigler-Granados, P., Valerio, M., Whitworth, K., Hildenbrand, Z. and Schug, K., 2018. Exploring the links between groundwater quality and bacterial communities near oil and gas extraction activities. *Science of The Total Environment*. Vol. 618. Pp. 165–173. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.264.
103. Schreyer, J., Lakes, T. (2014) Remote sensing-based approaches for modeling 3D vegetation information in urban areas. *14th International Conference on Computational Science and Its Applications. ICCSA*. Pp. 116–120.
104. Shaoping, K., Zhiwei, D., Bingchen, W., Huihui, W., Jialiang, L. and Hongbo, S., 2021. Changes of sensitive microbial community in oil polluted soil in the coastal area in Shandong, China for ecoresto-

- ration. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol. 207. P. 111551. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111551.
105. Shashkova, T. and Grigor'ev, Y., 2013. Impact of heavy metals on the trophic activity of daphnia depending on feeding conditions and age of crustaceans. *Contemporary Problems of Ecology*. Vol. 6(6). Pp. 662–666. DOI: 10.1134/S1995425513060103.
106. Shen, W., Zhu, N., Cui, J., Wang, H., Dang, Z., Wu, P., Luo, Y. and Shi, C., 2016. Ecotoxicity monitoring and bioindicator screening of oil-contaminated soil during bioremediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 124. Pp. 120–128. doi: 10.1016/j.ecoenv.2015.10.005.
107. Shulaev, N., Pryanichnikova, V., Kadyrov, R., Bykovsky, N., Damineva, R. and Ovsyannikova, I., 2020. Phytotoxic properties of electrically-cleaned oil-contaminated soils (the use of *Lepidium sativum* L. biotest). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 862. P. 062021. doi:10.1088/1757-899X/862/6/062021.
108. Sushkova, S.N., Minkina, T.M., Mandzhieva, S.S. and Tjurina, I.G., 2013. Elaboration and Approbation of Methods for Benzo[a]pyrene Extraction from Soils for Monitoring of the Ecological State in Technogenic Landscapes. *World Applied Sciences Journal*. Vol. 25(10). Pp. 1432–1437. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.25.10.11237.
109. Trofimov, I., Pavliukh L., Novakivska T. and Bondarenko D., 2020. Assessment of phytotoxicity of mixed aviation fuels using of plant testers. *International independent scientific journal*. Vol. 11. Pp. 9–17.
110. Vasconcelos, R., Lima, A., Lentini, C., Miranda, G., Mendonça, L., Silva, M., Cambuí, E., Lopes, J. and Porsani, M., 2020. Oil Spill Detection and Mapping: A 50-Year Bibliometric Analysis. *Remote Sensing*. Vol. 12(21). P. 3647. doi:10.3390/rs12213647.
111. Von Wahl, N., Heinen, S., Essen, H., Kruell, W., Tobera, R., Willms, I. (2010) An integrated approach for early forest fire detection and verification using optical smoke, gas and microwave sensors. *International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires, Forest Fires*. Vol. 137. Pp. 97–106.
112. Wanasinghe, T., Gosine, R., De Silva, O., Mann, G., James, L. and Warrion, P., 2020. Unmanned Aerial Systems for the Oil and Gas Industry: Overview, Applications, and Challenges. *IEEE Access*. Vol. 8. Pp.166980–166997. DOI 10.1109/ACCESS.2020.3020593.
113. Wang, S., Mu, L., Qi, M., Yu, Z., Yao, Z. and Zhao, E., 2021. Quantitative risk assessment of storm surge using GIS techniques and open data: A case study of Daya Bay Zone, China. *Journal of Environmental Management*. 289. P. 112514. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112514.
114. Wang, S., Mu, L., Qi, M., Yu, Z., Yao, Z., Zhao, E. (2021) Assessment of ecological stress caused by maritime vessels based on a comprehensive model using AIS data: Case study of the Bohai Sea, China. *Ecological Indicators*. Vol. 126. Pp. 1–16.
115. Wubalem, A., 2021. Landslide susceptibility mapping using statistical methods in Uatzau catchment area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, Vol. 8(1). DOI: 10.1186/s40677-020-00170-y.
116. Xing, X., Qi, S., Zhang, J., Wu, C., Zhang, Y., Yang, D. and Odhiambo, J., 2011. Spatial distribution and source diagnosis of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Chengdu Economic Region, Sichuan Province, western China. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 110(2). Pp. 146–154. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.05.001
117. Zhang, J., Dai, J., Chen, H., Du, X., Wang, W. and Wang, R., 2012. Petroleum contamination in groundwater/air and its effects on farmland soil in the outskirts of an industrial city in China. *Journal of Geochemical Exploration*. Vol. 118. Pp. 19–29. DOI: 10.1016/j.gexplo.2012.04.002.
118. Zhu, L., Zhang, C., Wang, J. and Du, Z., 2017. The acute toxic effects of 1-alkyl-3-methylimidazolium nitrate ionic liquids on *Chlorella vulgaris* and *Daphnia magna*. *Environmental Pollution*. Vol. 229. Pp. 887–895. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.07.055.

Дата поступления в редакцию: 12.04.2021

Дата рецензирования: 12.05.2021

Дата принятия к публикации: 18.05.2021

Пробьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках:

Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Сивков Д.Е., Дзюба Е.А., Хотяновская Ю.В., Егорова Д.О. Разработка геоинформационных систем для управления окружающей средой и экологической безопасностью в районах эксплуатируемых нефтяных месторождений // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Т. 7. № 1. С. 102–127. DOI: 10.17072/2410-8553-2021-1-102-127.

Please cite this article in English as:

Buzmakov S.A., Sannikov P.Yu., Sivkov D.E., Dziuba E.A., Khotyanovskaya Y.V., Egorova D.O. Development of geoinformation systems for environmental management and environmental safety in the areas of exploited oil deposits. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 2021. Vol. 7. No. 1. P. 102-127. DOI: 10.17072/2410-8553-2021-1-102-127.