ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Применение беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения

С.А.БУЗМАКОВ✉, П.Ю.САННИКОВ, Л.С.КУЧИН, Е.А.ИГОШЕВА, И.Ф.АБДУЛМАНОВА

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Кучин Л.С., Игошева Е.А., Абдулманова И.Ф. Применение беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 180-193. DOI: 10.31897/PMI.2023.22

Аннотация. Традиционный подход к режимным наблюдениям за развитием техногенных процессов на нефтяных месторождениях, состоящий в определении концентрации маркерных загрязнителей в различных природных средах, не обеспечивает необходимой полноты информации и оперативности ее поступления. В работе рассмотрен пример расширения спектра наблюдений за счет беспилотной аэрофотосъемки и ряда других методов. Установлены дешифровочные (для панхроматической съемки) признаки, фиксирующие такие последствия техногенной трансформации природной среды, как механогенез, битумизация и галогенез. Под техногенным механогенезом принимается физическое нарушение целостности экосистем, перемещение почв и грунтов; битумизация выражается в миграции указанных нефтяных углеводородов по почвам, грунтам, поверхностным, внутрипочвенным и подземным водам и их разрушении; миграция солей в указанных средах определена как галогенез. Наиболее надежными индикаторами являются линейно вытянутые ареалы погибшего (сухого) леса, темно-красные пятна в пересыхающих микропонижениях, водоемах. Установлено, что нефтепромысловое воздействие на верховом болоте приводит к антропогенной эвтрофикации, внедрению видов растений, нехарактерных эколого-ценотических групп, замене кустарничков травами, морфометрическими изменениями сосны лесной. В торфяных отложениях нарушенного участка зафиксирована необычная прослойка белесого неразложившегося мха. Момент начала выраженной техногенной трансформации установлен в ходе работы с архивом мультиспектральных космических снимков. Сплошное дистанционное зондирование с помощью беспилотной аэрофотосъемки и дешифрирование седиментологическими, геоботаническими методами существенно расширяют возможности изучения техногенной трансформации природной среды. Для обеспечения экологической безопасности целесообразно развитие дистанционных методов и технологий для их включения в систему наблюдений экологического мониторинга.

***Ключевые слова*:** техногенная трансформация; механогенез; битумизация; галогенез; беспилотный летательный аппарат; панхроматическая съемка; мультиспектральная съемка; седимент; антропогенная эвтрофикация; NDVI

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596018**.**

Поступила: 29.10.2022 ***Принята: 13.02.2023*** ***Онлайн: 23.03.2023*** ***Опубликована: 25.04.2023***

Введение. Устойчивое развитие таких регионов, как Пермский край, связано с защитой природной среды при добыче полезных ископаемых. Обеспечение экологической безопасности при добыче нефти в значительной мере определяется уровнем развития мониторинга окружающей среды. Механические нарушения и загрязнение вызывают техногенную трансформацию природной среды во время строительства и эксплуатации объектов нефтедобычи. Выраженное влияние происходит при сжигании попутного газа через тепловое воздействие [1] и ингредиентное загрязнение воздуха [2]. Зональные особенности локальных экосистем (тип почв, климат) значительно влияют на характер проявления трансформационных процессов [3].

Общепринятые методы наблюдений нефтепромыслового воздействия основаны на отборе образцов основных природных сред (почва, вода, воздух) [4] и выявлении концентрации маркерных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

загрязняющих веществ: углеводородов, хлоридов, фенолов, микроэлементов и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) [5]. Получаемые оценки важны, но не позволяют однозначно интерпретировать направление техногенных процессов и определять их скорость в пространстве и во времени. Использование комплекса дистанционных (беспилотной аэрофотосъемки), геоинформационных, геохимических, геоботанических методов существенно улучшает пространственно-динамические возможности изучения техногенных процессов [6].

В настоящее время имеется принципиальная возможность оценки состояния окружающей среды на основе применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [7], с помощью которых ведется мониторинг площадных, точечных и линейных источников загрязнения окружающей среды, что позволяет оперативно и точно определять уровни загрязнения [8]. Показана целесообразность и перспективность развития метрологического и методического обеспечения такого вида наблюдений [9].

Космическая съемка панхроматическими и мультиспектральными камерами позволяет идентифицировать объекты нефтепромысловой инфраструктуры [10], участки рубок леса [11], участки просадки грунта [12], относительно крупные разливы нефти [13-15], оценивать динамику растительности по имеющимся многолетним архивам изображений [16]. Аэрофотосъемка в панхроматическом режиме также позволяет фиксировать объекты нефтепромысловой инфраструктуры, разливы, рубки [17], проводить мониторинг целостности трубопроводов [18]. При этом точность возрастает, а площадной порог обнаружения снижается. При помощи мультиспектральной съемки следят за динамикой восстановления нарушенных земель [19], разливами нефти [20]. Лидарная (лазерная) съемка применяется для оценки состояния древостоя [21]. Тепловизионная аэрофотосъемка широко применима для идентификации нефтяных разливов [22, 23], в том числе на водных объектах [24], для определения параметров влажности почвы [25], идентификации протечек нефти и газа из трубопроводов [26].

Значительный опыт седиментологического изучения торфяных колонок для выявления нефтепромыслового техногенеза известен по публикациям на материале из Западной Сибири [27, 28]. Наиболее очевидное направление – анализ распределения микроэлементов по профилю [29-31], и их радиальная миграция с течением времени [32, 33]. На геохимический состав торфяной толщи влияют не только углеводороды нефти, но и сопутствующие минеральные компоненты соли, содержащиеся в буровых растворах [34, 35]. Для этого направления исследований интерес представляет опыт применения БПЛА для экологического мониторинга месторождений полиметаллических сульфидных руд [36].

В ходе изучения растительности на техногенных участках нефтепромыслов исследователи обращают внимание на изменения доли экологических групп в сложении структуры фитоценоза, внедрение и увеличение обилия отдельных групп трав [37], морфологические изменения древостоя [38]. Существует опыт применения БПЛА для восстановления природной среды методами биоремедиации [39].

Цель работы – апробация применения беспилотной аэрофотосъемки для диагностики техногенной трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения.

Работа выполнена на примере нефтяного месторождения, находящегося на севере Пермского края в болотном комплексе средней тайги.

Методология. Общая схема, иллюстрирующая этапы исследования природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения, показана на рис.1.

Аэрофотосъемка в оптической части спектра проведена 22 августа 2021 г. совместно с сотрудниками ООО «Финко», ГК «Беспилотные системы» (Ижевск) на высоте 400 м над поверхностью Земли. Перекрытие снимков 55 %, съемка производилась каждые 70 м полета. Использовался беспилотный летательный аппарат российского производства Supercam S350F. В результате обработки материалов аэрофотосъемки был создан ортофотоплан, который для удобства работы разбит на 71 тайл, общим объемом 14,6 Гб. Разрешение полученного изображения составляет около 8,5 см/пиксель.

Дешифрирование ортофотопланов проводилось в программе ArcGIS (ESRI), основано на визуальных признаках объектов, однозначно определяемых на изображениях заданного разрешения.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 180-193 DOI: 10.31897/PMI.2023.22
© С.А.Бузмаков, П.Ю.Санников, Л.С.Кучин, Е.А.Игошева, И.Ф.Абдулманова, 2023

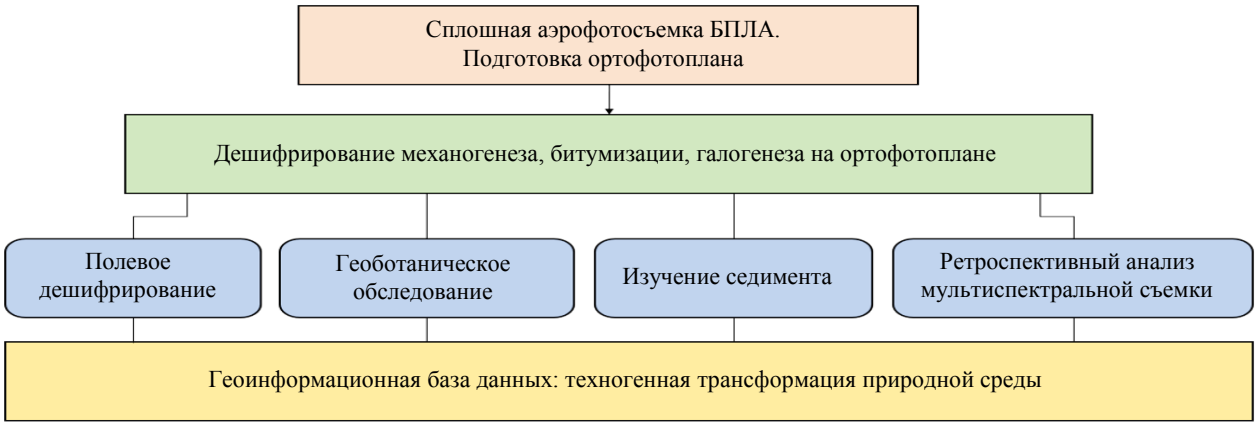


Рис.1. Этапы исследования

Нефтепромысловый техногенез обусловлен обустройством, авариями, утечками и технологическими выбросами во время разработки месторождений нефти, обычно делится на три основных типа: механогенез, битумизация, галогенез. Под механогенезом подразумевают перемещение грунтов, физическое нарушение целостности природных комплексов, почвенно-растительного покрова. Наиболее активно механогенез проявляется на этапах строительства и обустройства нефтепромысловых объектов. Битумизация выражается в загрязнении природной среды и ее компонентов углеводородами нефти. Развитие процесса техногенного галогенеза происходит под воздействием высокоминерализованных потоков с подтоварными водами, в составе которых наиболее значимы водорастворимые хлориды, а также сульфаты и карбонаты. Основными причинами возникновения битумизации и галогенеза считаются нарушения герметичности оборудования, вызванные несовершенством технологии и нарушением технологических регламентов. Дешифрирование каждого из типов техногенеза имеет свои особенности.

Дешифрирование последствий механогенеза. На всей изучаемой площади выделены 10 типов антропогенных объектов, появление которых прямо или косвенно обусловлено обустройством нефтяного месторождения (рис.2). Нефтепромысловые объекты: площадки скважин, трубопроводы, ЛЭП, автодороги, карьер, искусственные водные объекты, другие технические сооружения; объекты смешанного происхождения: вырубки, лесные дороги и рекреационные участки. Вырубка может быть вызвана либо эксплуатацией лесных ресурсов, либо нуждами нефтяного производства; лесные дороги стихийно возникают из-за обслуживания технических объектов; работающие около водоемов люди склонны создавать рекреационные участки.

Для идентификации механогенеза было достаточно прямых дешифровочных признаков: формы объекта, цвета, особых признаков нефтепромысловых объектов (квадратный контур обваловки вокруг скважин). Идентификация некоторых объектов была сложнее – в этом случае дополнительно использовались косвенные признаки: тень характерной формы, отбрасываемая опорами ЛЭП; продолжительные прямые участки с уничтоженной лесной растительностью были признаком полос отвода нефте-, газо-, водопровода, ЛЭП; участки вырубок (в отличие от ветровалов и буреломов) отмечались следами движения тяжелой лесовозной техники. Данные о ежегодных потерях леса [40] использовались для уточнения выявленных вырубок. Сведения о расположении и наименовании отдельных ниток трубопровода брались из интернет-ресурса «Публичная кадастровая карта» (Росреестр).

Дешифрирование последствий битумизации. Проявления битумизации определялись наличием контрастных пятен темного (черного) цвета на поверхности земли или водных объектов (рис.3, *а*), которые предположительно соответствовали разливам нефти на открытых участках. Пятна темно-красного цвета в пересыхающих микропонижениях, предположительно связываемые с интенсивным развитием отдельных групп гидробионтов, также указывали на углеводородные загрязнения. В качестве участков, подвергшихся битумизации или галогенезу, рассматривались линейно вытянутые полосы сухостоя (погибшего древостоя) (рис.3, *б*).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2023.22

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 180-193
© С.А.Бузмаков, П.Ю.Санников, Л.С.Кучин, Е.А.Игошева, И.Ф.Абдулманова, 2023



Нефтепромысловые объекты | Трубопроводы | ЛЭП



Автодороги | Вырубки | Песчаный карьер



Искусственные водные объекты | Технические сооружения | Рекреационный участок

Рис.2. Фрагменты ортофотоплана с примерами дешифрируемых последствий механогенеза



Рис.3. Фрагменты ортофотоплана с участками, имеющими признаки битумизации – пятна черного и темно-красного цвета (*а*) и линейно вытянутые полосы усыхающего древостоя (*б*), галогенеза – смена цвета водоема на голубовато-белесый в правой части снимка (*в*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Дешифрирование последствий галогенеза. Основываясь на имеющемся опыте сходного исследования [41], которое авторский коллектив реализовал в южной части Пермского края на закарстованной территории, для поиска участков проявления техногенного галогенеза использованы три типа дешифровочных признаков:

• помутнение воды и смена цвета водоема на голубовато-белесый (рис.3, *в*), обусловленное большим количеством нанометровых дисперсных частиц гидрированных сульфатов (растворение гипса) в воде [42];

• смена цвета водоема на зелено-желтый (предположительно объясняется интенсивным разрастанием галофильной водной растительности, водорослей в засоленных водоемах);

• скопление белых проявлений (пятен) на поверхности земли.

Подготовка геоинформационной базы данных исследования. Для обработки информации в программе ArcGIS (ESRI) была создана геоинформационная база данных, где территория нефтяного месторождения полностью относится к водосборному бассейну озера площадью 3419,8 га. Помимо исходных данных (ортофотопланов, границ водосбора озера, нефтепромысловых объектов) в нее включены результаты дешифрирования – два полигональных слоя для объектов механогенеза (117 участков), галогенеза и битумизации (35 участков). Дополнительно все ареалы с последствиями механогенеза были поделены на три категории по отношению к нефтепромысловой деятельности: не имеющие отношения к нефтепромыслам; вероятно обусловлены нефтедобычей; прямо связаны с добычей нефти и сопутствующими процессами.

Полевое дешифрирование. В ходе этапа прямых полевых работ (полевого дешифрирования) обследовались все выделенные участки. В местах, где факт разливов подтверждался, проводилась фотофиксация характерных следов техногенеза, выполнялись геоботанические описания. На одном из участков проведен отбор двух торфяных колонок для выявления особенностей распределения нефтяных углеводородов в торфяном профиле. Рабочие записи велись в полевом журнале наблюдений.

Изучение торфяных отложений. Бурение торфяника и отбор торфяной колонки проведены при помощи торфяного (русского) бура, согласно ГОСТ 17644-83. Все извлеченные отложения фотографировались. После описания полуметровые керны упаковывались в полиэтиленовую пленку и помещались в пластиковые трубы ПВХ для предотвращения деформации при транспортировке и хранении.

Геоботаническое обследование. Для определения характера изменений растительного покрова в результате нефтяного загрязнения были проведены маршрутные исследования, а также заложены три пробные площадки (ПП) для геоботанических описаний: две на ключевом участке и одна – на ненарушенном (фоновом) участке болота. Геоботанические описания проведены по общепринятым методикам. Эколого-ценотический анализ флоры сообществ, сформировавшихся на торфянике, проведен по характеристикам видов, представленным в базе данных «Флора сосудистых растений Центральной России» Института математических проблем биологии РАН[1]. Анализ состава сообществ по условиям питания и увлажнения проведен согласно видовым описаниям проекта «Плантариум»[2]. Для оценки экотопов по экологическим шкалам флористические списки обработаны в программе EcoScaleWin[3]. Фитоиндикационный анализ сообществ проведен по общепринятым шкалам Элленберга и Ландольта.

Анализ мультиспектральной космической съемки прошлых лет. Спутниковые снимки получены из открытого архива USGS EarthExplorer. Анализ проводился по снимкам Landsat – 5, 7, 8 за 1999-2022 гг. Всего проанализировано 27 изображений в двух режимах: в естественных цветах и по индексу NDVI, который рассчитывался как среднее значение для пикселей, соответствующих исследуемым участкам.

[1] *Ханина Л.Г., Заугольнова Л.Б., Смирнова О.В. и др.* База данных «Флора сосудистых растений Центральной России». URL: https://www.impb.ru/eco/ (дата обращения 29.10.2022).

[2] Плантариум. Растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. URL: https://www.plantarium.ru/ (дата обращения 29.10.2022).

[3] *Зубкова Е.В., Ханина Л.Г., Грохлина Т.И., Дорогова Ю.А.* Компьютерная обработка геоботанических описаний по экологическим шкалам с помощью программы EcoScaleWin. Йошкар-Ола: Марийский государственный университет, Пущинский государственный университет, 2008. 96 с.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

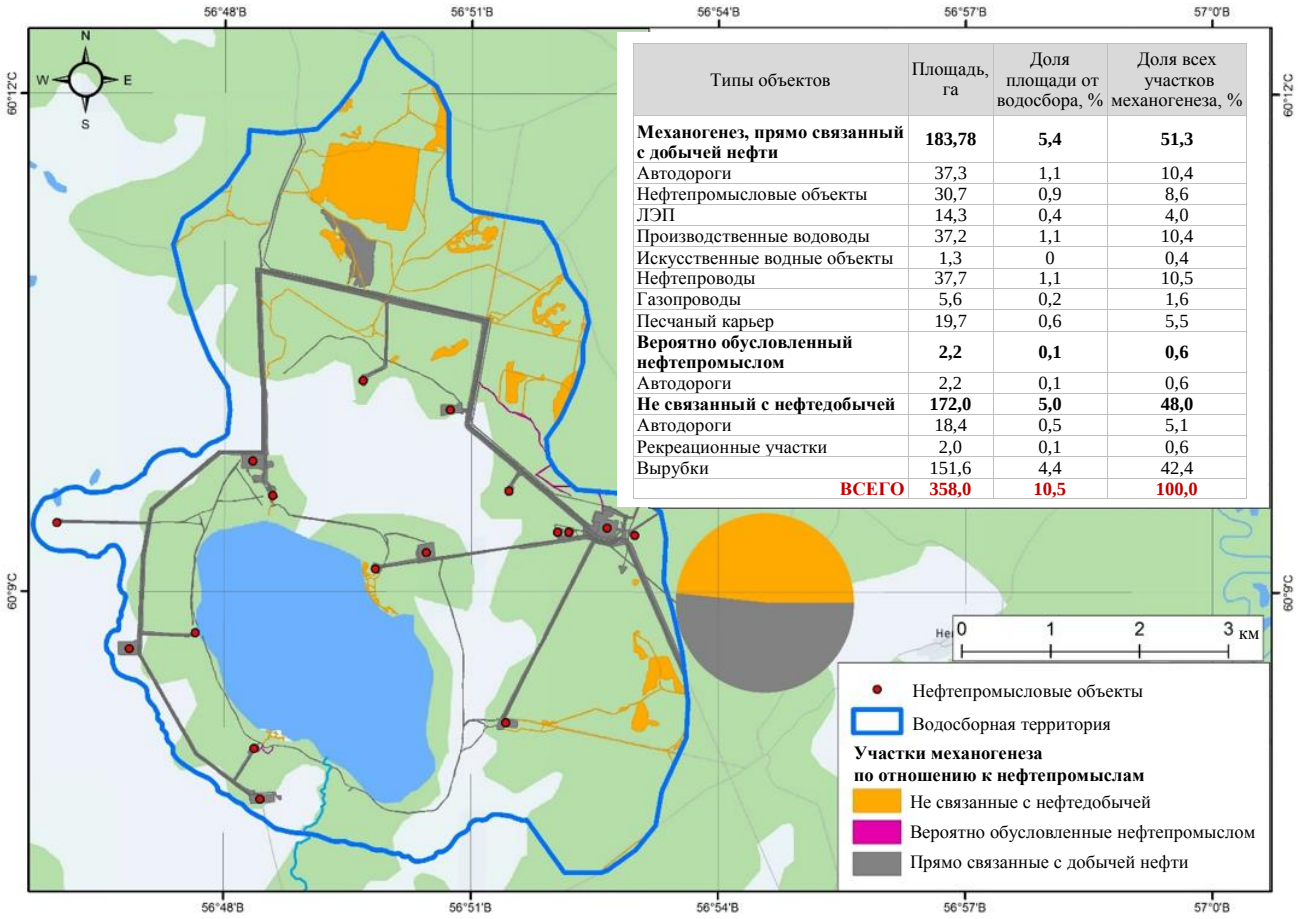
Обсуждение результатов. *Дешифрирование материалов аэрофотосъемки в оптической части спектра*. В результате дешифрирования ортофотоплана на изучаемой территории выявлено 117 участков, подвергшихся механогенезу (рис.4), общей площадью 358 га, что соответствует 9,0 % от водосборной территории.

Механогенез, прямо обусловленный нефтедобычей, составляет чуть более половины (51,3 %) от площади всех участков, подвергшихся механическому воздействию. Большую часть таких участков составляют автодороги, промысловые водо- и нефтепроводы, нефтепромысловые объекты и песчаный карьер; 48 % всех участков механогенеза не связаны с нефтедобычей – это вырубки, в меньшей степени лесные дороги и рекреационные участки.

Доля линейных объектов инфраструктуры месторождения составила 81,1 %, а площадных – 18,9 %, что сопоставимо с результатами, полученными [43] для Среднего Приобья (соответствует подзонам средней и северной тайги), где средняя (по 25 месторождениям) доля линейных объектов составляла 84,97 %, а площадные – 15,11 %. Сходные значения отмечены и на примере 17 месторождений Тюменской обл. [44]: доли линейных объектов 18,9 %, площадных – 21,1 %.

На обследованной территории доля земель, нарушенных при прокладке автодорог, составила 1,7 %, 1/3 из которых представляет собой стихийно развивающуюся сеть лесных дорог. Установлено [45], что для южно-степной зоны эти показатели составляют 4,2 %, лесостепной – 2,5 %. Заметно меньшая доля участков, занятых полосами отвода автодорог, хорошо соотносится с распространенностью естественных географических барьеров. В данном случае основным барьером широкого развития дорожной сети является высокая заболоченность территории.

Дешифрированием ортофотопланов выявлено 35 участков, имевших признаки проявления битумизации и галогенеза. Их общая площадь составила 7,78 га. Большая часть участков (24) выявлена по наличию черных контрастных пятен, шесть участков – по признаку смены цвета водоема на голубовато-белесый, отмечено три линейных участка сухостоя, два понижения темно-красного цвета. Таких дешифровочных признаков галогенеза, как смена цвета водоема на желто-зеленый и белые солепроявления на поверхности почвы, не выявлено.



Типы объектов	Площадь, га	Доля площади от водосбора, %	Доля всех участков механогенеза, %
Механогенез, прямо связанный с добычей нефти	**183,78**	**5,4**	**51,3**
Автодороги	37,3	1,1	10,4
Нефтепромысловые объекты	30,7	0,9	8,6
ЛЭП	14,3	0,4	4,0
Производственные водоводы	37,2	1,1	10,4
Искусственные водные объекты	1,3	0	0,4
Нефтепроводы	37,7	1,1	10,5
Газопроводы	5,6	0,2	1,6
Песчаный карьер	19,7	0,6	5,5
Вероятно обусловленный нефтепромыслом	**2,2**	**0,1**	**0,6**
Автодороги	2,2	0,1	0,6
Не связанный с нефтедобычей	**172,0**	**5,0**	**48,0**
Автодороги	18,4	0,5	5,1
Рекреационные участки	2,0	0,1	0,6
Вырубки	151,6	4,4	42,4
ВСЕГО	**358,0**	**10,5**	**100,0**

Рис.4. Последствия механогенеза на изучаемой территории

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Полевое дешифрирование. В ходе прямого полевого обследования установлено, что на 10 из 35 ранее дешифрированных участков обнаружены явные признаки битумизации и галогенеза. Из них шесть участков, обнаруженных по голубовато-белесому цвету водной поверхности (признак галогенеза), при прямом обследовании оказались серией болотных микропонижений, на поверхности которых отмечена плотная маслянистая пленка (проявление битумизации). Предположительным источником поступления углеводородов предполагается внутрипромысловый нефтепровод, проходящий вдоль ближайшей автодороги. Лишь на двух из 24 участков, предварительно отмеченных наличием черных пятен, установлены явные признаки битумизации: масляные пленки на поверхности воды, интенсивный запах углеводородов, обширные участки уничтоженной или значительно угнетенной растительности.

На обоих участках, отмеченных в ходе дешифрирования наличием темно-красных пятен, во время полевого обследования установлены признаки нефтепромыслового техногенеза: обильный красно-бурый осадок на поверхности почвы, наземной растительности, дне пересыхающего водоема, а также интенсивная деградация травяно-кустарничкового яруса и поражение хвои нижних ярусов ветвей молодых сосен на верховом болоте. Источником воздействия, вероятно, служат нефтепромысловые объекты, к которым эти участки примыкают. При этом процессы, вызвавшие такие изменения, пока остаются неясными, для чего требуются дополнительные исследования.

В двух ареалах линейно вытянутой полосы сухостоя полученные результаты пока не позволяют сделать однозначного вывода. Их появление может быть связано как с нарушением естественного стока грунтовых вод из-за строительства дороги или трубопровода, так и с разливом нефти и/или подтоварных вод (солевым загрязнением).

На 23 участках полевое обследование явных признаков битумизации и галогенеза не выявило. В одном случае таким участком была полоса сухостоя, где древостой погиб в результате подтопления по контуру промплощадки. Остальные 22 участка, где предварительное дешифрирование не было подтверждено полевыми данными, на ортофотоплане выделялись наличием черных пятен на поверхности воды или почвы. Наиболее типичным примером (17 участков) такого рода являются понижения длиной в десятки метров, образовавшиеся вдоль дорог, трубопроводов, площадок скважин. Еще три значительно более длинных (до 0,2-0,5 км) участка, выделенные по темному цвету, представляли собой естественные стоковые образования, слегка пониженные относительно общей поверхности верхового болота и выделяющиеся на фоне соседних иным составом растительности. На двух небольших озеровидных водоемах, ранее отмеченных по темному цвету, признаков битумизации и галогенеза также не установлено. Выраженный темный цвет водоема обусловлен взвешенными в воде частицами торфа.

Установлено, что в условиях высокой заболоченности и повсеместного распространения торфяных почв темный цвет естественных и техногенных переувлажненных понижений является нормой. Эффективность такого признака крайне низка, в данном случае она составила лишь 8 %. Таким образом, для заболоченных территорий темный цвет не может быть достаточным дешифровочным признаком битумизации. Такие участки требуют дополнительной проверки. Перспективными направлениями развития исследования следует считать проведение мультиспектральной, тепловизионной, лидарной съемок и их дальнейший анализ.

Напротив, другие дешифровочные признаки (темно-красный цвет водоемов и пересыхающих понижений, голубовато-белесый цвет водоемов) оказались заметно более эффективными. При этом, если для закарстованной территории в зоне смешанных хвойно-широколиственных лесов голубовато-белесый цвет указывал на процессы галогенеза [42], то на исследуемой заболоченной территории средней тайги такой он может свидетельствовать об углеводородном загрязнении.

Исследования с использованием аэроспектральной фотографии, полученной с БПЛА, позволяют рассчитать глубину и химический состав водотоков [46]. Проведение мультиспектральной аэрофотосъемки также дает возможность построения карт вегетационных и других индексов (прежде всего NDVI). Индексы хорошо показывают текущее функциональное состояние растительности, могут свидетельствовать о восстановлении нарушенных участков [19]. Аэрофотосъемка при помощи тепловизора, особенно в сочетании с другими видами съемок, способна дать дополнительные полезные сведения. Так, нефтяное загрязнение на поверхности воды и почвы выявляется по заметной температурной разнице между загрязненными и фоновыми участками [24].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В условиях высокой заболоченности и выровненности рельефа разница в высотных отметках, определяющая направления стока, может быть минимальной. Необходимую точность оценки уклонов не могут обеспечить ни крупномасштабные топографические карты, ни глобальные цифровые модели рельефа. Аэрофотосъемка лазерным сенсором позволяет создать высокоточную цифровую модель рельефа. Такие данные позволяют однозначно определять направления миграции веществ и устанавливать источник загрязнения. Кроме того, лидарная съемка позволяет установить толщину углеводородной пленки на поверхности водных объектов [23].

Седиментологическое исследование. На участке вблизи куста скважин № 4 в ходе полевого обследования обнаружены наиболее выраженные проявления нефтепромыслового техногенеза. Участок располагается на верховом болоте и имеет языковидную вытянутую форму общей протяженностью более 300 м. В границах отмечены обширные ареалы полной или частичной деградации растительности, пятна открытого торфа, резкий запах углеводородов, выраженные масляные пленки, поражение хвои нижних ярусов ветвей молодых сосен. Вероятные причины трансформации следующие: разлив нефти, разлив буровых шламов, разлив подтоварных вод или смеси этих субстанций.

На объекте были отобраны две торфяные колонки: на ненарушенном фоновом участке и в границах трансформированного ареала. В ходе визуального осмотра стратиграфической колонки с нарушенного участка обнаружена необычная прослойка (21-34 см) светлого неразложившегося сфагнума. На фоновом участке такой слой отсутствовал.

Наличие столь необычной прослойки мы связываем с эффектом «консервации» сфагнума в анаэробных и сильно увлажненных условиях, формирующихся при нефтяном разливе. Так, при разливах нефти в верхних слоях олиготрофных почв сорбируются высокомолекулярные фракции: смолы и асфальтены [26], которые обладают обволакивающим эффектом, препятствующим аэробным условиям для сфагновой подушки верхового болота. В результате этого нефть затрудняет окислительную деструкцию органического вещества, необходимую для процессов разложения в верхнем слое торфяника [31].

Дальнейшая перспектива изучения полученного седимента связана с анализом концентрации ряда элементов и соединений. Распределение тяжелых металлов по торфяной колонке наблюдается различно при битумизации и при галогенезе. Установлено [29], что при нефтяном загрязнении концентрации маркерных элементов и соединений по профилю торфяника распределяются следующим образом: в верхнем слое аккумулируются металлы-поллютанты (Ti, V, Cr, Ni, Zr, Ba и лантаниды), лабильные Cl, Ca, Mn, Zn, Cu, Sr с легкими фракциями углеводородов с течением времени из верхних слоев мигрируют в глубь профиля.

Соотношение валового содержания Ni:Br в золе загрязненного торфа служит индикатором, указывающим на преобладающий характер (нефтяного или солевого) загрязнения [32]. Установлено, что отношение Ni:Br > 1,5 является признаком загрязнения нефтью, отношение Ni:Br < 0,7 – солевое, а при 0,7 < Ni:Br < 1,4 – смешанное.

Перспективным представляется и сравнительный микробиологический анализ. Так, установлено, что под воздействием нефтяного техногенеза в торфяной почве происходят преобразования микробоценоза и микробиологической активности. В условиях нефтяного загрязнения изменяется численность и соотношение трофических групп почвенных микроорганизмов [47].

Анализ флоры и растительности. На участке вблизи куста скважин № 4 с наиболее выраженными проявлениями нефтепромыслового техногенеза были заложены три геоботанические пробные площадки 20×20 м.

Пробная площадка № 1 заложена в основании трансформированного ареала. Полностью отмерший древесный ярус из 19 деревьев *Pinus sylvestris* L. имеет высоту до восьми метров, диаметр стволов достигает 22 см. Ближе к границам пятна загрязнения встречается подрост *Pinus sylvestris*, *Betula pendula* Roth, *Populus tremula* L. возрастом около 10 лет. Жизненность молодых деревьев хорошая, прирост текущего года стволов сосны достигает 25 см. Кустарники отсутствуют. Травы и кустарнички произрастают пятнами, внутри которых общее проективное покрытие составляет 30 %. Такие травяно-кустарничковые пятна покрывают около 40 % поверхности ПП, остальная

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.А.Бузмаков, П.Ю.Санников, Л.С.Кучин, Е.А.Игошева, И.Ф.Абдулманова, 2023

часть участка оголена. Преобладающим видом является *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, также зафиксированы немногочисленные экземпляры *Typha latifolia* L. и *Tussilago farfara* L., небольшие пятна *Oxycoccus palustris* Pers., *Juncus alpinus* Vill. Ближе к краям ПП произрастают *Eriophorum polystachyon* L., *Carex canescens* L., *Carex rostrata* Stokes. Живой моховой покров отсутствует.

Пробная площадка № 2 заложена в 150 м от границы деградированного участка. Единичные деревья *Pinus sylvestris* произрастают только ближе к границам загрязненного пятна и имеют высоту до семи метров, диаметр стволов до 18 см. Деревья сильно ослабленные, отмирающие. Ближе к границам пятна также распространен подрост *Pinus sylvestris, Betula pendula, Populus tremula.* Жизненность подроста хорошая. Прирост текущего года подроста сосны лесной достигает 30 см, но хвоя на нижних ярусах ветвей некоторых молодых деревьев имеет рыжий цвет, но не осыпается. Вероятно, некроз произошел в текущем или прошлом году. Из кустарников ближе к границам пятна встречаются единичные экземпляры *Betula nana* L. Кустарнички отсутствуют. Травы в центральной части ПП произрастают реже (общее проективное покрытие 20 %), чем на его окраине (общее проективное покрытие 40 %). В центре пятна преобладают *Juncus alpinus, Carex canescens.* К ним примешиваются *Eleocharis palustris* (L.) Roem. et Schult. и *Carex limosa* L. Дальше от центра пятна появляется кольцо из *Calamagrostis epigeios, Eriophorum vaginatum* L. При этом становится больше *Carex canescens* и *Carex limosa*. С западной стороны пятна произрастают *Carex rostrata* и *Carex juncella* (Fries) Th. Fries. Ближе к краю встречается *Alopecurus aequalis* Sobol. Живого мохового покрова нет.

Фоновая пробная площадка заложена в сосново-пушицево-кустарничково-сфагновом болоте. Крайне разреженный древостой из *Pinus sylvestris* имеет высоту до 3 м, диаметр стволов достигает 11 см. Единичные деревья выше трех метров высохшие. Диаметр их стволов достигает 19 см. Наиболее высокое дерево имеет высоту 5,5 м. Отмечены две старые сухие осины со следами пожара на стволах. Прирост текущего года молодых экземпляров сосны лесной не превышает 10 см, растения искривленные, но характеризуются удовлетворительным состоянием, порыжения хвои нет. *Betula nana* образует крайне разреженный, но характеризующийся равномерным распространением, кустарниковый ярус со средней высотой 0,7 м. Травяно-кустарничковый ярус образуют *Eriophorum vaginatum* и болотные кустарнички *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Ledum palustre* L., *Andromeda polifolia* L., *Oxycoccus palustris*, общее проективное покрытие которых составляет 50 %. Сплошной моховой покров образуют сфагновые мхи.

На площадках, заложенных на нарушенном участке, разнообразие видов растений выше, чем на фоновом. Отмечен значительно больший прирост текущего года сосны лесной и появление в подросте нехарактерных для олиготрофных болот *Betula pendula, Populus tremula.* Подрост деревьев формируется ближе к периферии пятна, в осевой части языкообразного пятна его нет. Кустарнички практически отсутствуют. Открытые поверхности торфяника зарастают травами – осоками, пушицами, болотницей, ситниками, злаками. Моховой покров отсутствует.

Полученные выводы подтверждают результаты изучения антропогенной динамики растительных сообществ олиготрофных болот на нефтяных месторождениях в лесной зоне Западной Сибири, где на загрязненных участках также отмечены следующие признаки: появление в древесно-кустарниковом ярусе нетипичных для верховых болот видов, ситников и малолетников [37]; морфометрические изменения молодых экземпляров сосны лесной [38]; появление в травяно-кустарничковом ярусе злаков; активное развитие мезотрофных и эвтрофных видов преимущественно из семейства *Cyperaceae* [37], а также угнетение и снижение обилия олиготрофных кустарничков.

Сравнительный анализ представленности групп флоры, выделенных по различным показателям – эколого-ценотическому, по отношению к увлажнению, к условиям питания (трофности) – продемонстрировал сложность состава сообществ на деградированном участке и относительную простоту на фоновом участке (рис.5), что обусловлено мозаичным изменением трофности и влажности местообитания после поступления нефтяной органики. Сохранились прежние группировки растительности верхового болота и добавились пионерные, свойственные нарушенным, луговым и зональным лесным сообществам виды.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2023.22

Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 180-193
© С.А.Бузмаков, П.Ю.Санников, Л.С.Кучин, Е.А.Игошева, И.Ф.Абдулманова, 2023

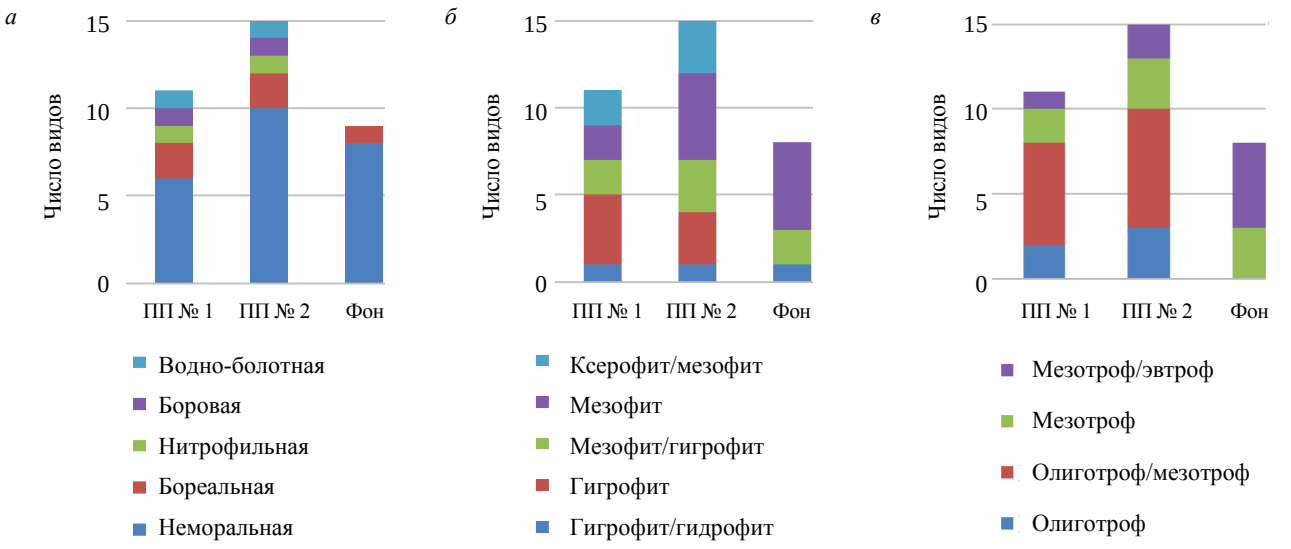
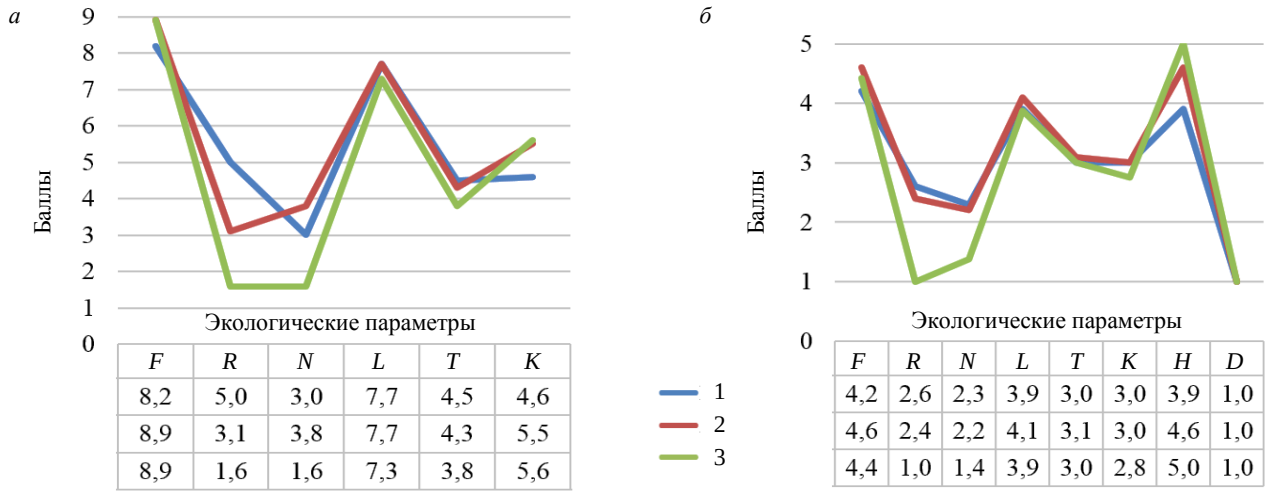


Рис.5. Сравнительный анализ представленности групп флоры (видов), выделенных по следующим показателям: *а* – эколого-ценотическому; *б* – отношению к увлажнению; *в* – условиям питания (трофности)



F	*R*	*N*	*L*	*T*	*K*
8,2	5,0	3,0	7,7	4,5	4,6
8,9	3,1	3,8	7,7	4,3	5,5
8,9	1,6	1,6	7,3	3,8	5,6

F	*R*	*N*	*L*	*T*	*K*	*H*	*D*
4,2	2,6	2,3	3,9	3,0	3,0	3,9	1,0
4,6	2,4	2,2	4,1	3,1	3,0	4,6	1,0
4,4	1,0	1,4	3,9	3,0	2,8	5,0	1,0

Рис.6. Экологические параметры местообитаний по шкалам Элленберга (*а*) и Ландольта (*б*)

F – увлажнение почвы; *R* – кислотность почвы; *N* – богатство почвы элементами минерального питания; *L* – светолюбие; *T* – температура; *K* – континентальность; *H* – гумусированность почвы; *D* – гранулометрический состав почвы (дефицита аэрации)

1 – ПП № 1; 2 – ПП № 2; 3 – фон

Восстановительная сукцессия после поступления нефтяных углеводородов происходит при участии видов различных эколого-ценотических групп, тогда как ненарушенное сообщество состоит только из видов водно-болотной группы и *Pinus sylvestris* (боровой группы). Относительно степени увлажнения разница между фоновым и нарушенным участками состоит в появлении видов, предпочитающих как менее (мезофиты), так и более (гигрофиты/гидрофиты) увлажненные местообитания. Анализ (рис.5) также продемонстрировал увеличение степени трофности на загрязненных участках, что ранее было зафиксировано исследованиями, проведенными на территории Западной Сибири [37, 38].

При оценке экологических параметров местообитаний по шкале Элленберга (рис.6, *а*) прослеживаются явные различия характеристик пробных площадок фонового и трансформированного участков по параметрам кислотности почв и богатства элементами минерального питания. Если для фонового участка характерны растения, которые произрастают только на кислых почвах, то для обеих площадок на нарушенном участке отмечены растения, способные произрастать как на сильно кислых, так и на нейтральных почвах. Показатели богатства почв элементами минерального питания значительно выше на нарушенном участке.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.А.Бузмаков, П.Ю.Санников, Л.С.Кучин, Е.А.Игошева, И.Ф.Абдулманова, 2023

Сходные результаты демонстрирует анализ экологических параметров по шкале Ландольта (рис.6, *б*): заметные отличия наблюдаются по степени кислотности и условиям питания. Для нарушенного участка характерна вторичная антропогенная эвтрофикация, проявляющаяся усилением роли мезотрофных и эвтрофных видов, ослаблением позиций олиготрофов и оксилофитов, появлением в составе сообщества видов с различными требованиями к условиям увлажнения и представителей нехарактерных для него эколого-ценотических групп, заменой кустарничков травами, изменением морфометрических признаков подроста сосны лесной.

Эффективная идентификация и мониторинг нефтепромыслового техногенеза возможны на основе фитоиндикации на различных уровнях – организменном, популяционном, ценотическом. Перспективность геоботанических исследований заключается в определении региональных фитоиндикаторов различного типа загрязнений (солевого, нефтяного, смешанного) аналогично исследованиям, проведенным в Западной Сибири и Калининградской обл. [37], и определении характера протекания восстановительной сукцессии в экосистемах различного типа.

Реконструкция истории техногенной трансформации. По участку вблизи куста скважин № 4 с наиболее выраженными проявлениями нефтепромыслового техногенеза история техногенной трансформации реконструирована при помощи космической съемки за 1999-2022 гг.

Анализ динамики фотосинтетической активности растений (рис.7) нарушенного и фонового участка показал, что до 2010 г. значения индекса NDVI на обоих участках совпадали или были очень близки, средняя разница – около 0,006. С 2010 г. происходит заметное (относительно фона) падение NDVI на нарушенном участке, в 2010-2016 гг. среднее различие в индексах составляет 0,1. В 2017-2022 гг. средняя разница NDVI фонового и нарушенного участка возрастает до 0,2, а в отдельные годы достигает 0,3-0,4.

Примечательно, что анализ тех же снимков в естественных цветах дает иные результаты. Так, заметная разница между фоновым и нарушенным участками начинает проявляется только с 2012 г., т.е. на два года позже, чем по фотосинтетической активности растений (NDVI). Подобное несоответствие свидетельствует о том, что первой реакцией растительности на нефтепромысловое воздействие является падение фотосинтетической активности, и только потом происходят смена видового состава и изменения в структуре фитоценоза.

Основным пороговым параметром, определяющим возможность использования космической съемки, следует считать площадь и конфигурацию границ участка с признаками нефтепромыслового техногенеза. Для надежной идентификации необходимо, чтобы нарушенный участок занимал не менее пяти-шести пикселей. Для сенсоров, установленных на аппаратах Landsat, это соответствует площади не менее 4 500 м^2, а для Sentinel-2 – не менее 900 м^2.

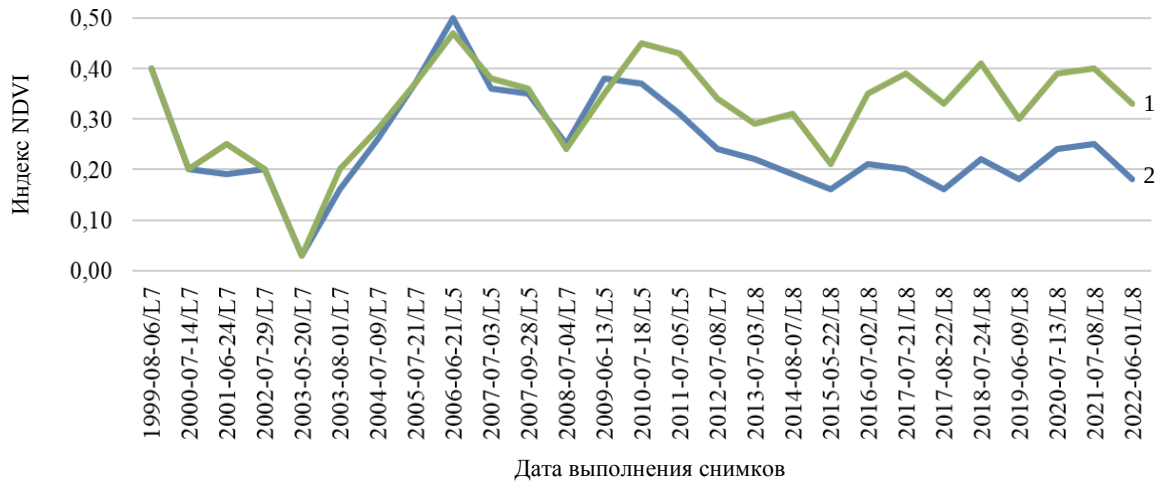


Рис.7. Динамика NDVI на нарушенном и фоновом участках

1 – фоновый; 2 – нарушенный

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Возможно, более информативным может оказаться использование усовершенствованного варианта, нормализованного дифференцированного вегетационного индекса (Enhanced Normalized Difference Vegetation Index – ENVI), для расчета которого помимо ближнего инфракрасного также используются зеленый и синий каналы. Об этом свидетельствует опыт выявления участков, подверженных углеводородному загрязнению в Индонезии [13].

Заключение. Сплошное обследование изучаемой территории эксплуатируемого нефтяного месторождения с помощью аэрофотосъемки беспилотным летательным аппаратом позволило идентифицировать такие техногенные процессы в окружающей природной среде, как механогенез, битумизация и галогенез.

Дешифрирование аэрофотосъемки в видимой части спектра позволяет однозначно определять все основные проявления механогенеза. Прямо обусловленные эксплуатацией нефтяного ресурса механические нарушения природной среды составили не более половины (51,3 %) от площади всех подобных участков на территории месторождения. Вторая часть изменений связана с лесопользованием, стихийной сетью лесных дорог и рекреацией.

Участки, подверженные битумизации и галогенезу, дешифрируются менее надежно. Наименее надежным дешифровочным признаком стали контрастные черные пятна на поверхности воды или почвы, которые в большинстве случаев обусловливались естественной причиной – повсеместным распространением торфяных почв в районе исследования. Более надежными признаками развития нефтепромыслового техногенеза служили обширные сплошные полосы сухостоя, а также красные и темно-красные пятна в пересыхающих микропонижениях, водоемах. Для однозначной интерпретации результатов дешифрирования необходимо проведение прямого полевого обследования. Также перспективным будет выявление региональных фитоиндикаторов для различных типов техногенеза.

Ретроспективный анализ мультиспектральной космической съемки (динамика NDVI) позволяет установить момент начала техногенного воздействия. Из-за поступления нефтяных углеводородов в природный комплекс начинается техногенная битумизация, ухудшаются водно-воздушные условия торфяных почв для фонового фитоценоза, и растения снижают фотосинтетическую активность, что и отражает индекс NDVI. Для применения этого метода могут подойти лишь сравнительно крупные нарушенные участки – не менее 0,45 га (при использовании Landsat – 5, 7, 8). Для выявления меньших по площади перспективно использование специально оборудованных беспилотных летательных аппаратов.

Сравнительный анализ стратиграфии торфяных колонок на фоновом участке верхового болота и трансформированном в процессе битумизации участке выявил в составе трансформированного прослойку (более 10 см) светлого неразложившегося сфагнума. Предположительно это связано с эффектом «консервации» сфагнума в анаэробных и сильно увлажненных условиях, формирующихся при поступлении нефти.

Изменения растительности верхового болота под воздействием нефтепромыслового техногенеза вызваны изменением воздушно-водного режима торфа, что приводит к уменьшению роли олиготрофов и увеличивает значение мезотрофов, эвтрофов в структуре растительных сообществ. Частично в нарушенных местообитаниях сохранились прежние группировки растительности верхового болота и добавились пионерные, свойственные нарушенным луговым и зональным лесным сообществам, виды. Зафиксированные в районе среднетаежных пихтово-еловых лесов изменения растительного покрова верхового болота сходны с данными по верховым болотам Западной Сибири.

Перспективными направлениями исследования следует считать проведение и анализ тепловизионной, мультиспектральной и лидарной съемок по ключевым участкам, а также геохимическое и микробиологическое исследования торфа в различных слоях отобранных торфяных колонок.

Применение сплошного дистанционного зондирования на базе беспилотной аэрофотосъемки и дешифрирование с помощью седиментологических, геоботанических методов существенно расширяет возможности изучения техногенной трансформации природной среды. Для обеспечения экологической безопасности целесообразно развитие дистанционных методов и технологий с целью включения их в систему наблюдений экологического мониторинга.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.А.Бузмаков, П.Ю.Санников, Л.С.Кучин, Е.А.Игошева, И.Ф.Абдулманова, 2023

ЛИТЕРАТУРА

1. *Порозова А.С., Санников П.Ю.* Оценка влияния сжигания попутного газа на радиальный прирост *Pinus sylvestris* (Озерное месторождение нефти, Пермский край, Россия) // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Т. 7. № 2. С. 58-74. DOI: 10.17072/2410-8553-2021-2-58-74

2. *Бактыбаева З.Б., Сулейманов Р.А., Валеев Т.К. и др.* Эколого-гигиеническая оценка загрязнения атмосферного воздуха на нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих территориях Республики Башкортостан и состояние здоровья населения // Здоровье населения и среда обитания. 2020. № 2. С. 26-32. DOI: 10.35627/2219-5238/2020-323-2-26-32

3. *Быкова М.В., Пашкевич М.А.* Оценка нефтезагрязненности почв производственных объектов различных почвенно-климатических зон Российской Федерации // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 46-59.

4. *Чижова М.А., Хайруллина Л.И., Тучкова О.А.* Принципы создания и структура экологического мониторинга на объектах нефтедобычи // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 16. С. 290-292.

5. *Бачурин Б.А.* Эколого-геохимическая оценка продуктов деградации нефти в условиях гипергенеза // Антропогенная трансформация природной среды. 2019. № 5. С. 8-14.

6. *Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Сивков Д.Е. и др.* 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

7. *Пашкевич М.А., Смирнов Ю.Д., Данилов А.С.* Оценка качества окружающей среды с применением малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 269-271.

8. *Danilov A.S., Smirnov U.D., Pashkevich M.A.* The system of the ecological monitoring of environment which is based on the usage of UAV // Russian Journal of Ecology. 2015. Vol. 46. № 1. P. 14-19. DOI: 10.1134/S1067413615010038

9. *Кремчеев Э.А., Данилов А.С., Смирнов Ю.Д.* Состояние метрологического обеспечения систем мониторинга на базе беспилотных воздушных судов // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 96-105. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.96

10. *Ferrarese F., Pappalardo S., Codato D. et al.* High resolution satellite images for environmental monitoring of oil production in Western Amazon: the case of Yasuní National Park // AGILE 2017, 9-12 May 2017, Wageningen.

11. *Singh A., Kushwaha S.K.P.* Forest Degradation Assessment Using UAV Optical Photogrammetry and SAR Data // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2020. Vol. 49. № 3. P. 559-567. DOI: 10.1007/s12524-020-01232-2

12. *Mirzaii Z., Hasanlou M., Samieie-Esfahany S., Ajourlou P.* Land Subsidence Monitoring in Azar Oil Field Based on Time Series Analysis // Proceedings of the 3rd International Electronic Conference on Remote Sensing, 22 May – 5 June 2019, Basel, Switzerland. MDPI, 2019. DOI: 10.3390/ECRS-3-06190

13. *Susantoro M.T., Wikantika K., Saepuloh A., Harsolumakso A.* Utilization of Vegetation Indices to Interpret the Possibility of Oil and Gas Microseepages at Ground Surface // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. The 1st UPI International Geography Seminar 2017, 8 August 2017, Indonesia. 2018. Vol. 145. № 012012. DOI: 10.1088/1755-1315/145/1/012012

14. *Новохатин В.В., Осипова Н.Г.* Космический мониторинг аварийных нефтеразливов в пределах лицензионных участков на территории Западной Сибири // Московский экономический журнал. 2021. № 3. С. 57-63. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10167

15. *Löw F., Stieglitz K., Diemar O.* Terrestrial oil spill mapping using satellite earth observation and machine learning: A case study in South Sudan // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 298. № 113424. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113424

16. *Соромотин А.В., Бродт Л.В.* Мониторинг растительного покрова при освоении нефтегазовых месторождений по данным многозональной съемки Landsat // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2018. Т. 4. № 1. С. 37-49. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-37-49

17. *Wanasinghe T., Gosine R.G., De Silva O. et al.* Unmanned Aerial Systems for the Oil and Gas Industry: Overview, Applications, and Challenges // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 166980-166997. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3020593

18. *Grib N., Melnikov A., Grib G., Kachaev A.* Use of unmanned aerial systems for assessing the dynamics of hazardous engineering and geocryological processes on linear facilities // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 192. № 04006. DOI: 10.1051/e3sconf/202019204006

19. *Negara T., Jaya I.N.S., Kusmana C. et al.* Drone image-based parameters for assessing the vegetation condition the reclamation success in post-mining oil exploration // Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control). 2021. Vol. 19. № 1. P. 105-114. DOI: 10.12928/TELKOMNIKA.V19I1.16663

20. *Hassani B., Sahebi M.R., Asiyabi R.M.* Oil Spill Four-Class Classification Using UAVSAR Polarimetric Data // Ocean Science Journal. 2020. Vol. 55 (3). P. 433-443. DOI: 10.1007/s12601-020-0023-9

21. *Vepakomma U., Cormier D.* Valuing forest stand at a glance with UAV based LIDAR // ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. XLII-2/W13. P. 643-647. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-643-2019

22. *Катковский Л.В.* Расчет параметров тепловизионной съемки объектов с беспилотных авианосителей // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2020. Т. 18. № 2. С. 53-61. DOI: 10.35596/1729-7648-2020-18-2-53-61

23. *Al-Shammari A., Levin E., Shults R.* Oil spills detection by means of UAS and low-cost airborne thermal sensors // ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. Vol. IV-5. P. 293-301. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-5-293-2018

24. *De Kerf T., Gladines J., Sels S., Vanlanduit S.* Oil Spill Detection Using Machine Learning and Infrared Images // Remote Sensing. 2020. Vol. 12 (24). № 4090. DOI: 10.3390/rs12244090

25. *Yurong Gao, Xugang Lian, Linlin Ge.* Inversion model of surface bare soil temperature and water content based on UAV thermal infrared remote sensing // Infrared Physics & Technology. 2022. Vol. 125. № 104289. DOI: 10.1016/j.infrared.2022.104289

26. *Nooralishahi P., López F., Maldague X.* A Drone-Enabled Approach for Gas Leak Detection Using Optical Flow Analysis // Applied Sciences. 2020. Vol. 11. № 1412. DOI: 10.3390/app11041412

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

27. *Водяницкий Ю.Н., Аветов Н.А., Савичев А.Т. и др.* Содержание химических элементов в торфяных почвах, засоленных буровыми сточными водами на участке добычи нефти в Среднем Приобье // Агрохимия. 2013. № 1. С. 75-84.

28. *Кульков М.Г., Воробьев Д.С.* Идентификация следов нефтяного загрязнения органогенных донных отложений комбинированным методом твердофазной экстракции и тонкослойной хроматографии // Журнал аналитической химии. 2017. Т. 72. № 2. С. 177-186. DOI: 10.7868/S0044450217020074

29. *Водяницкий Ю.Н., Савичев А.Т., Трофимов С.Я., Шишконакова Е.А.* Металлы в загрязненном нефтью торфе (Западная Сибирь) // Бюллетень Почвенного института имени В.В.Докучаева. 2011. Т. 67. С. 67-79. DOI: 10.19047/0136-1694-2011-67-67-79

30. *Trofimov S.Y., Arzamazova A.V., Kinzhaev R.R. et al.* Mineralization of Organic Matter in the Oil-Polluted and Background Soils of the Middle Ob Region under Laboratory Conditions // Eurasian Soil Science. 2022. Vol. 55. № 4. P. 533-540. DOI: 10.1134/S1064229322040147

31. *Леднев А.В., Скворцова И.А.* Влияние нефтяного загрязнения и мелиоративных добавок на агрохимические свойства аллювиальных торфяных почв // Агрохимический вестник. 2017. № 3. С. 49-54.

32. *Дитц Л.Ю., Дудина Т.Н., Цускман Е.И., Катункина Е.В.* Геоэкологические проблемы территорий нефтедобычи // Успехи современного естествознания. 2020. № 3. С. 72-77. DOI: 10.17513/use.37348

33. *Водяницкий Ю.Н., Аветов Н.А., Савичев А.Т. и др.* Влияние загрязнения нефтью и пластовыми водами на зольный состав олиготрофных торфяных почв в районе нефтедобычи (Приобье) // Почвоведение. 2013. № 10. С. 1253. DOI: 10.7868/S0032180X13100146

34. *Водяницкий Ю.Н., Аветов Н.А., Савичев А.Т. и др.* Лабораторное определение состава твердой фазы техногенно засоленного торфяника: возможности и ограничения // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2020. № 3. С. 39-46.

35. *Козлов С.А., Аветов Н.А., Савичев А.Т.* Геохимические особенности верховых и переходных болот в условиях воздействия шламовых амбаров // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2017. № 4. С. 26-34.

36. *Danilov A., Smirnov Y., Petrova T., Pashkevich M.* Using drones of preconstruction monitoring conducting in mining enterprise // International Journal of Ecology & Development. 2015. Vol. 30. Iss. 1. P. 36-42.

37. *Тюрин В.Н.* Изменение растительности на загрязненных участках верховых болот (нефтяные месторождения Западной Сибири) // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Пятого международного полевого симпозиума, 19-29 июня 2017, Ханты-Мансийск. Ханты-Мансийск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2017. С. 124-126.

38. *Аветов Н.А., Шишконакова Е.А.* Понятие трофности в связи с антропогенной эвтрофикацией верховых болот Ханты-Мансийского Приобья // Бюллетень Почвенного института имени В.В.Докучаева. 2013. № 71. С. 36-51.

39. *Danilov A.S., Smirnov Yu.D., Pashkevich M.A.* Use of biological adhesive for effective dust suppres-sion in mining operations // Journal of Ecological Engineering. 2015. Vol. 16 (5). P. 9-14. DOI: 10.12911/22998993/60448

40. *Hansen M., Potapov P., Moore R. et al.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. Vol. 342. Iss. 6160. P. 850-853. DOI: 10.1126/science.1244693

41. *Khotyanovskaya Y., Buzmakov S., Sannikov P.* Identification of oil mining technogenesis based on aerial photography data // Journal of Soils and Sediments. 2022. Vol. 23. P. 973-988. DOI: 10.1007/s11368-022-03357-y

42. *Плотникова М.Д., Медведева Н.А., Бортник А.Г.* О причинах возникновения замутненности вод в бассейне реки Ясыл // Антропогенная трансформация природной среды. 2019. № 5. С. 45-50.

43. *Московченко Д.В., Бабушкин А.Г., Идрисов И.Р.* Оценка техногенной нарушенности нефтяных месторождений Среднего Приобья с использованием спутниковых снимков // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 5. С. 53-61. DOI: 10.31857/S0869780920050069

44. *Соромотин А.В.* Экологические последствия различных этапов освоения нефтегазовых месторождений в таежной зоне Тюменской области // Сибирский экологический журнал. 2011. Т. 18. № 6. С. 813-822.

45. *Мячина К.В.* Особенности воздействия объектов нефтегазодобывающей инфраструктуры на подзональные ландшафты Волго-Уральского степного региона // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2019. № 4. С. 21-29. DOI: 10.24411/2304-9081-2019-15021

46. *Первухин Д.А., Ильюшин Ю.В.* Параллельный анализ геоданных гидролитосферных пластов минеральной воды Кисловодского месторождения Нарзана // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 706-711. DOI: 10.18454/PMI.2016.5.706

47. *Егорова Д.О., Бузмаков С.А.* Биоремедиация нефтезагрязненных темно-серых почв с использованием бактериальных и растительных агентов // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 3. С. 17-21. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-3-17-21

***Авторы*: С.А.Бузмаков,** *д-р географических наук, профессор, lep@psu.ru, https://orcid.org/0000-0002-5144-0714* (*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*), **П.Ю.Санников,** *канд. географических наук, доцент, http://orcid.org/0000-0001-7973-301X* (*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*), **Л.С.Кучин,** *лаборант, https://orcid.org/0000-0001-5283-5681* (*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*), **Е.А.Игошева,** *аспирант, https://orcid.org/0000-0002-9602-7587* (*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*), **И.Ф.Абдулманова,** *лаборант, https://orcid.org/0000-0001-6058-5176* (*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0