

## Исследование эволюции участков нефтяных разливов по космическим снимкам высокого разрешения на примере Самотлорского месторождения

В.И. Кравцова\*, М.В. Зимин

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия  
E-mail: \*valentinamsu@yandex.ru

**Аннотация.** Предложена методика визуального дешифрирования аварийных нефтяных разливов по космическим снимкам со спутника WorldView-3, оснащенного каналами среднего инфракрасного SWIR-диапазона, с проверкой по разновременным снимкам сверхвысокого разрешения в системе GoogleEarth. Анализ изображения четырех крупных разливов в юго-восточной части Самотлорского месторождения позволил проследить деграционные изменения разных типов растительности и процессы ее самовосстановления за 2017–2022 гг. Сопоставление результатов анализа снимков с литературными данными, полученными при натурных исследованиях, показывает их хорошее соответствие и необходимость дальнейшей разработки методов дистанционного мониторинга нефтяных разливов с использованием SWIR-диапазона.

**Ключевые слова:** космические снимки, SWIR-диапазон, высокое разрешение, дешифрирование, многовременный анализ, нефтяные разливы, деграция растительности, самовосстановление.

**Для цитирования:** Кравцова В.И., Зимин М.В. Исследование эволюции участков нефтяных разливов по космическим снимкам высокого разрешения на примере Самотлорского месторождения // Актуальные проблемы нефти и газа. 2023. Вып. 1(40). С. 45–66. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-40.art5>

### Введение

Разработка нефтяных месторождений и транспортировка нефти сопровождаются ее потерями при авариях нефтепроводов. По данным экологов в России при авариях теряется около 1% ежегодно добываемой нефти. Наряду с отдельными крупными катастрофами, большинство многочисленных разливов невелики по площади, но они в районах добычи и транспортировки нефти возникают постоянно и повсеместно. Воздействие разливов на окружающую среду, так же как и потери добытого ресурса определяют актуальность исследований по обеспечению их мониторинга и использованию для этих целей дистанционных методов.

Лаборатория аэрокосмических методов кафедры картографии и геоинформатики географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в содружестве с Кембриджским университетом проводит исследования в области разработки технологий дистанционного аэрокосмического мониторинга нефтяных разливов на примере месторождения Самотлор.

Дистанционным методам в нефтегазовой области уделяется существенное внимание. Наиболее полная сводка по их применению содержится в коллективной монографии под редакцией акад. В.Г. Бондура «Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса» [1].

Среди широкого круга задач, которые можно решать с применением аэрокосмических методов и технологий в интересах нефтегазовой отрасли, В.Г. Бондур выделяет и мониторинг текущего состояния нефте-, газо- и продуктопроводов для выявления утечек [2]. Однако на наиболее распространенных аэрокосмических снимках в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне изображение нефти на суше плохо отличается от других объектов – воды, гарей, теней. В то же время при воздействии нефти на травяной покров и почву изменяются их яркостные характеристики, связанные с вариациями спектральной отражательной способности почв и растительности, которые регистрируются аппаратурой аэрокосмической съемки. Поэтому для выявления по снимкам утечек нефти прибегают к методам, используемым для оценки состояния растительности, создавая индексные изображения, в первую очередь на основе расчета вегетационных индексов. В дистанционных методах давно и успешно применяется нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalised Difference Vegetation Index), основанный на разности яркостей в красной и ближней инфракрасной зонах спектра [2]. В дополнение к этому, традиционно применяемому индексу NDVI, предложен новый трехканальный индекс TCHVI (Three-Channel Vegetation Index – трехзональный нормированный вегетационный индекс) [3], учитывающий также яркость в зеленой зоне; он позволяет лучше разделять близкие в видимом диапазоне изображения нефтяного загрязнения и гарей. Другой индекс – SWVI (Short-Wave Vegetation Index), основанный на сопоставлении яркости в ближней и средней инфракрасной зонах, оказался более пригодным для оценки состояния растительности лишайниковых тундр [4].

Компанией «Совзонд», совместно с Научно-аналитическим центром рационального природопользования Ханты-Мансийского национального округа – Югры, в 2007–2009 гг. выполнена разработка технологии обработки многоспектральных данных дистанционного зондирования на примере спутниковых снимков ALOS/AVNIR2 в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне для автоматизированного выявления и картографирования нефтезагрязненных и нарушенных земель на основе применения современных алгоритмов классификации с использованием эталонной наземной информации [5]. Особенности технологии в печати не освещались.

Обращение к среднему инфракрасному диапазону SWIR (называемому в иностранной литературе коротковолновым, Short-Wave InfraRed диапазоном), съемку в котором начали проводить со спутников с 2000-х годов, оказалось чрезвычайно важным для дистанционного мониторинга нефтяного загрязнения, поскольку предшествующие лабораторные спектрометрические исследования показали наличие пиков поглощения углеводородосодержащих веществ в SWIR-диапазоне [6, 7].

Нефтяные разливы на трубопроводах в большинстве случаев относятся к числу малых объектов, по площади занимают десятые или сотые доли гектара, и для их обнаружения необходимы снимки сверхвысокого – метрового и субметрового – разрешения. Поэтому особое внимание привлекает начавший работать с 2013 г. суперспектральный спутник WorldView-3, ведущий съемку в панхроматическом канале с разрешением 31 см и оснащенный 8 каналами видимого и ближнего инфракрасного диапазона с разрешением 1,24 м, а также 8 каналами SWIR-диапазона с разрешением 3,7 м.

Сотрудничаящим в настоящем проекте организациям удалось обеспечить такие снимки юго-восточной части Самотлорского месторождения на две даты: 1 июля 2019 г. и 26 августа 2022 г. Характеристика снимков приводится в табл. 1.

Таблица 1

**Спектральные диапазоны съемки  
спутника WorldView-3**

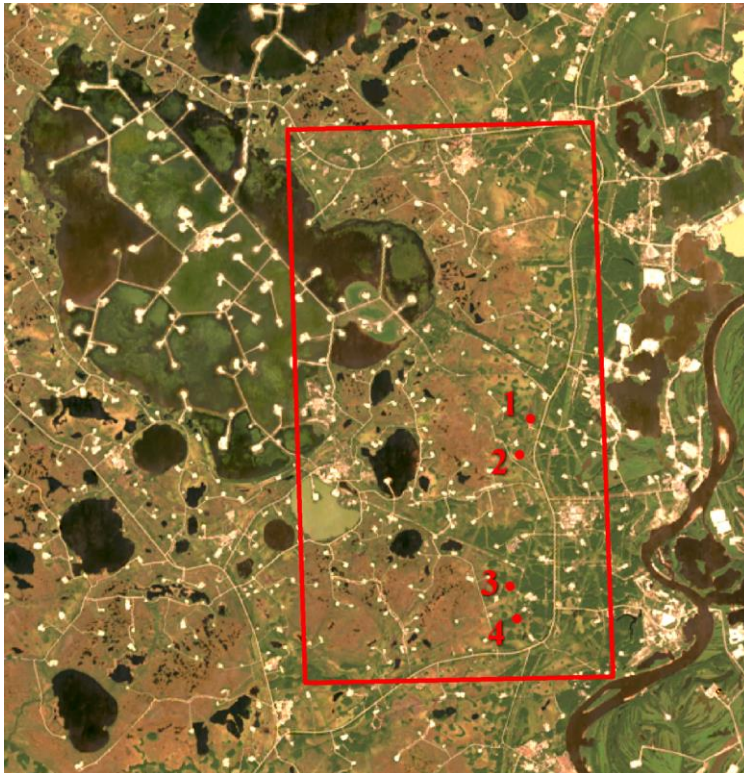
Название диапазона	Длины волн, мкм
Режим VNIR, панхроматический Разрешение 31 см	
PAN	0,50–0,90
Режим VNIR, многоспектральный Разрешение 1,24 м	
Coastal	0,40–0,45
Blue	0,45–0,51
Green	0,51–0,53
Yellow	0,575–0,625
Red	0,63–0,69
RedEdge	0,705–0,745
NIR-1	0,77–0,895
NIR-2	0,86–1,04
Режим SWIR Разрешение 3,7 м	
SWIR-1	1,195–1,225
SWIR-2	1,550–1,590
SWIR-3	1,640–1,680
SWIR-4	1,710–1,750
SWIR-5	2,145–2,185
SWIR-6	2,185–2,225
SWIR-7	2,235–2,285
SWIR-8	2,295–2,365

Цель исследования – на основе анализа космических снимков высокого пространственного разрешения оценить возможности использования цветных снимков, полученных при RGB-синтезе спектральных изображений с участием SWIR-зоны, для детектирования нефтяных разливов, предложив на первом этапе методику их экспертного визуального дешифрирования как основу

для дальнейшей разработки способов их автоматизированного дешифрирования. При использовании разновременных снимков высокого разрешения – проследить изменения растительности на участках нефтяных разливов.

**Район и методика исследований**

Район исследования, охваченный снимками со спутника WorldView-3, расположен к востоку от озера Самотлор и занимает территорию размером 7,5 × 13,5 км между юго-восточным берегом этого озера на западе и долиной реки Вах на ее меридиональном отрезке перед впадением в Обь выше Нижневартовска – на востоке (рис. 1). Это выположенная равнина третьей террасы озерно-аллювиального генезиса с абсолютными высотами 50–63 м и превышениями над урезом 20–27 м [8]. Примыкающая к озеру территория занята низовыми и верховыми грядово-мочажинными болотами, а восточная часть вдоль долины р. Вах более дренирована и покрыта елово-сосново-березовыми лесами. В переходной зоне между верховыми болотами и лесами небольшие остаточные участки леса на микроповышениях рельефа 0,5 м чередуются с разделяющими их выположенными ложбинами, занятыми травянисто-кустарничковой и кустарничковой растительностью. У восточной границы участка проходит автотрасса Нижневартовск–Радужный, восточнее которой вдоль нее протягивается магистральный нефтепровод. На всем участке развита густая сеть кустовых площадок нефтедобычи, соединяющих их дорог и промысловых трубопроводов. В разных направлениях территорию пересекают линии электропередач.

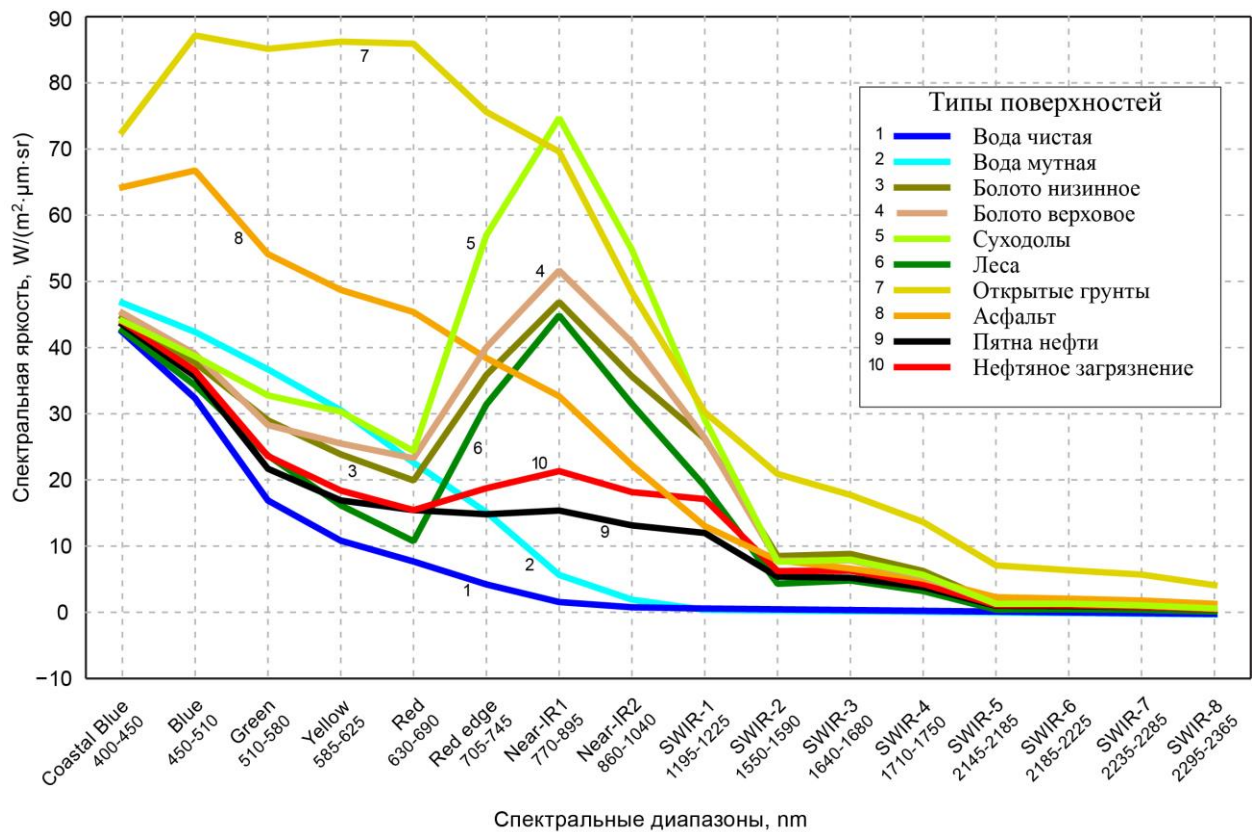


**Рис. 1.** Район исследования на снимке со спутника Landsat

**1-4** – положение крупных разливов, характеризуемых в статье

Основные природные и хозяйственные объекты исследуемого района различаются

по их спектральным характеристикам, что хорошо демонстрирует рис. 2.



**Рис. 2.** Кривые спектрального образа основных природных и хозяйственных объектов района

На рис. 2 приведены кривые спектральной яркости, полученные по снимку WorldView-3 01.07.2019 путем выделения на снимке площадей различных объектов исследуемого региона и осреднения в их пределах отражательной способности для каждого спектрального канала. Тип поверхности определялся на основе визуального дешифрирования снимка с учетом материалов полевого обследования региона, выполненного в 2021 г. магистром геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова И.Н. Пижанковым. Анализ кривых позволяет выбрать наилучший вариант цветового RGB-синтеза спектральных изображений для визуального дешифрирования и является основой для дальнейшей разработки методов автоматизированного дешифрирования.

Решению основной задачи проекта – разработке методов автоматизированного выявления нефтяных разливов по снимкам WorldView-3 – предшествовала экспертная оценка возможности их дешифрирования на основе визуального анализа изображений. Методика визуального дешифрирования включала два основных этапа. На первом этапе на участках вблизи трубопроводов на снимке 01.07.2019 в варианте цветового синтеза SWIR1-NIR1-RedEdge по цвету изображения предположительно выявляются участки нефтяного загрязнения. Их цвет варьирует от коричнево-фиолетового, почти черного для участков сплошного покрытия поверхности нефтью и полной гибели растительности, до фиолетово-коричневого при частичном покрытии нефтью и меньшей деградации растительности. Для подтверждения деградации растительности используется этот же снимок в варианте синтеза NIR-Red-Green, где сочная растительность изображается ярко розовым цветом, а голубые оттенки свидетельствуют об ее отсутствии. На втором этапе следует проверка наличия предпола-

гаемого разлива по снимкам сверхвысокого разрешения в информационной системе Google Earth, где «историческая линейка» предоставляет возможность просмотра снимков в годы, предшествующие и последующие за датой основного снимка в 2019 г. Используются ресурсы программного обеспечения Google Earth Pro, версия 7.3.6.9345, спутниковые покрытия компании Maxar Technologies и CNES/Airbus.

На этих снимках, представленных в системе с естественной цветопередачей, черный цвет загрязненной нефтью поверхности не отличим от цвета воды, гарей, теней; однако, проверка по серии одновременных снимков на участке, предположительно выделенном в качестве разлива на основе спектральных характеристик, позволяет по происходящим изменениям удостовериться в правильности предположения и проследить преобразование поверхности за несколько лет до, во время и после разлива. Такой анализ не только подтверждает правильность дешифрирования, но дает дополнительный материал об эволюции загрязненной территории, степени загрязненности в разные годы, повторяемости разливов, изменениях уровня деградации ландшафта, самовосстановлении растительности, а в ряде случаев и о проводимых рекультивационных мероприятиях. Поскольку в наших исследованиях охвачены разливы на разных по характеру растительности территориях – с травянисто-кустарниковым покровом, лесопосадками, мелколесьем, взрослыми лесами, то этот материал, несомненно, может представлять интерес для ландшафтных экологов. В связи с этим далее приводится детальная характеристика выявляемых по снимкам изменений на четырех различных по типу поверхности территориях, охваченных достаточно крупными разливами, произошедшими в 2018–2019 гг. в исследуемом районе.

### Изменения участков нефтяных разливов

Четыре участка, на примере которых прослежена эволюция территорий, охваченных нефтяными разливами, местоположение которых отмечено на рис. 1, расположены в районе трассы Нижневартовск–Радужный, в 300 м – 1 км западнее нее, в переходной полосе между верховыми болотами центральной приозерной части района и лесами ее более дренированной восточной приречной зоны. В этой переходной полосе небольшие островные участки лесов на микроповышениях рельефа сочетаются с безлесными ложбинами между ними, занятыми травянисто-кустарниковой растительностью. Для каждого участка вначале дается его изображение на снимке WorldView-3 1 июля 2019 г. (далее – WV-3), на котором предположительно обнаружен нефтяной разлив, а затем приводится серия одновременных изображений «исторической линейки» снимков в системе Google Earth, удостоверяющих факт разлива и позволяющих проследить изменения поверхности участка в период 2017–2022 гг.

Условные номера разливов соответствуют показанным на рис. 1.

### Нефтяной разлив № 1

Участок расположен в 350 м западнее трассы Нижневартовск–Радужный, южнее ответвления от нее дороги в сторону оз. Сомотлор, идущей вдоль канала; отделен от трассы широкой (100 м) полосой с 8 линиями промышленных трубопроводов. Участок имеет извилистую форму, протягивается в направлении С-Ю на 0,7 км при ширине до 0,25 км. Повторяет форму ложбины между лесными островами. Примыкает к трубопроводам дважды – в северной и южной частях. Площадь разлива в 2019 г. – 81 930 м<sup>2</sup>.

На снимке WV-3 1 июля 2019 г. в варианте синтеза SWIR1-NIR1-RedEdge (рис. 3а) контур предполагаемого разлива имеет коричнево-фиолетовый цвет, более темный в северной части, где он примыкает к трубопроводу; выделяется несколько участков возможного разрыва труб. В средней части ложбины цвет изображения более светлый, в южной – синеватый, а на участке между трубами – черно-синий.

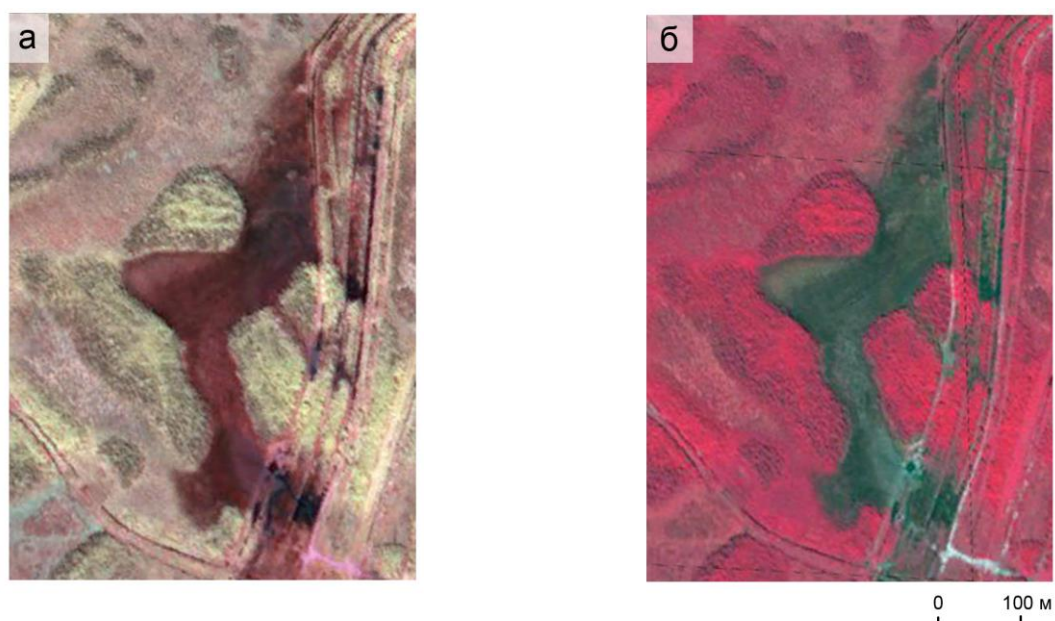


Рис. 3. Разлив № 1 на снимке WorldView 01.07.2019 в разных вариантах цветового синтеза: а – SWIR1-NIR1-RedEdge; б – NIR-Red-Green

На том же снимке в варианте синтеза NIR-Red-Green (рис. 3б) голубовато-серый и темно-серый цвета изображения этой ложбины свидетельствуют об отсутствии здесь зеленой растительности. В северной части контура достаточно четко видна его граница с соседней ложбиной, покрытой растительностью, изобразившейся розовым цветом.

На снимке WV-3 25 августа 2022 г. в тех же вариантах синтеза этот контур также

выделяется разными оттенками коричневого и серого цветов, но его конфигурация и характер изображения изменились.

История образования и дальнейшего состояния территории этого крупного нефтяного разлива, четко выявляемого на снимках WV-3 01.07.2019 и 25.08.2022, прослежена по «исторической линейке» снимков высокого разрешения в Google Earth, показывающей, что разливы на этом участке происходили неоднократно (рис. 4).

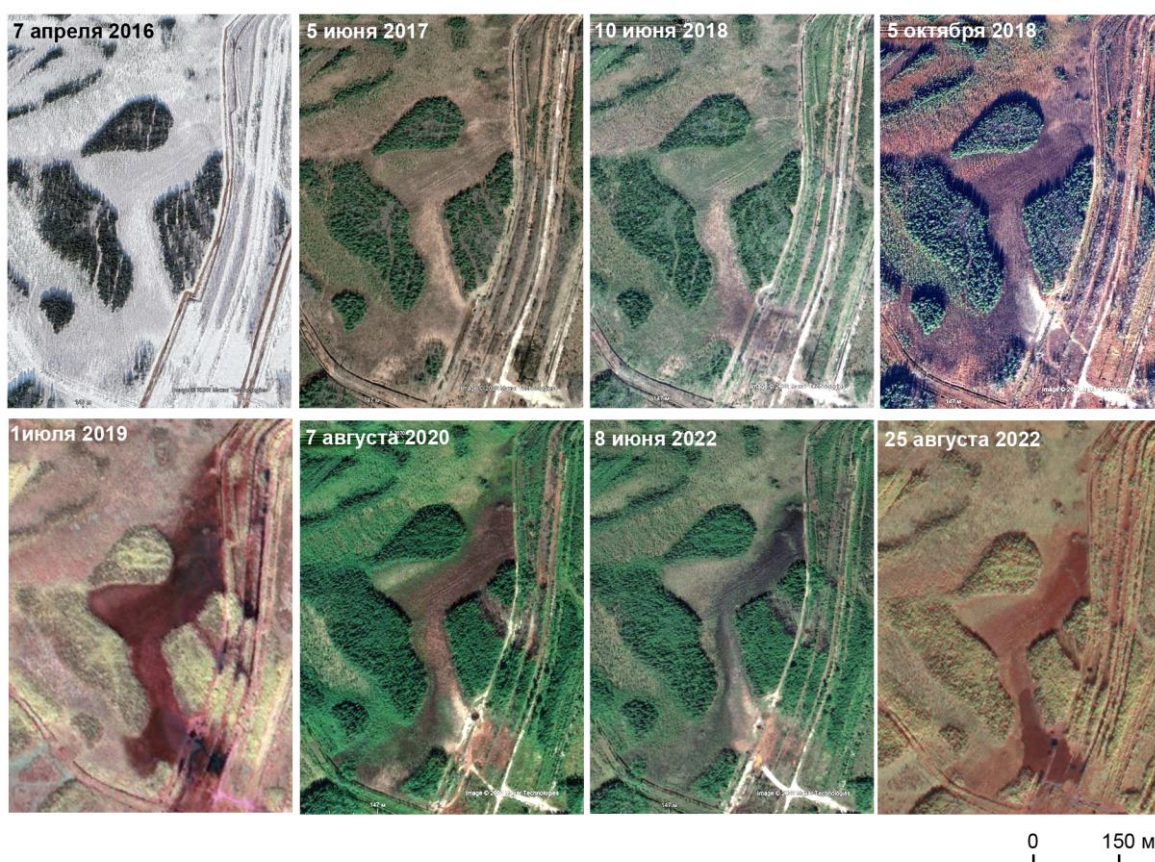


Рис. 4. Разновременные снимки территории нефтяного разлива № 1 (пояснения в тексте)

До 2018 г. эта незалесенная ложбина с травянисто-кустарниковой и мелколесной растительностью, расположенная между островными массивами лесов, не выделялась среди остальных безлесных участков. Разносезонные снимки позволяют проследить характер растительности в ее пределах. На снимке в марте 2013 г. со снежным покровом разделяются менее освоенная

растительностью средняя узкая часть ложбины и участки мелколесья в ее расширенных северной и южной частях. На снимке 7 апреля 2016 г. между темными лесными островами на заснеженной территории ложбины по теням разделяются участки более густых кустарников и мелколесья в северной и южной частях ложбины и разреженной растительности в ее средней части.

На снимке 5 июня 2017 г. в летнем ландшафте проявляются те же различия растительности – травянисто-кустарниковой в северной части ложбины и более разреженной в средней части ложбины, где много участков оголенного светлого грунта; южная расширенная часть ложбины занята травянисто-кустарниковой растительностью и разреженным мелколесьем.

На снимке 10 июня 2018 г. отмечаются некоторые изменения. В это время поверхность в северной и юго-западной частях ложбины уже зазеленела. Но в южной части ложбины и между трубами системы трубопроводов видны темно-серые пятна, возможно, загрязнения нефтесодержащей жидкостью в районе южного примыкания труб.

Существенные изменения отмечаются на снимке 5 октября 2018 г., зафиксировавшем значительный произошедший разлив нефти. Залитая нефтью поверхность северной части ложбины – темная, почти черная, на ее фоне слабо выделяются мелкие пятна крон кустов. Северная граница этого темного контура нефтяного разлива выражена не очень четко, за его пределами полосчатая структура теней кустов и редколесья сохраняется, но цвет поверхности более светлый буровато-коричневый, соответствующий увядающей мохово-травянистой растительности. Для темного пятна в южной расширенной части ложбины также характерна полосчато-пятнистая структура, обусловленная изображением теней крон мелколесья и кустов, между которыми просвечивает черная загрязненная нефтью поверхность. На участке трубопровода в южной части ложбины ярко выделяется светлое пятно, возможно, выброса солевого раствора, распространяющегося на север, в среднюю часть ложбины.

Снимок WV-3 1 июля 2019 г. в варианте синтеза SWIR1-NIR1-RedEdge четко выделяет весь контур этого разлива, удлинившийся в северном направлении, но сократившийся в южной части. На снимке в этом варианте синтеза, при разрешении снимков в зоне SWIR 3,7 м, структура изображения мелколесной растительности в пределах ложбины не отображается, но контур разлива в целом выделяется четко. На севере он примыкает к линии нефтепровода, начинаясь от его углового поворота. Видно несколько (5–6) точек прорыва труб на этом северном безлесном участке. Южнее, в лесном массиве, еще от одного источника (а возможно, и от трех – на разных трубах) образовалась струя прорыва в северную часть ложбины через лес. Залита и средняя часть ложбины. В южной части ложбины, на участке примыкания ее контура к трубопроводам, прорывы возможны на 4 линиях трубопроводов – поверхность между ними также залита нефтью. Однако, фиксируемая снимком площадь контура нефтяного разлива в южной части ложбины меньше, чем наблюдалась по снимку в октябре 2018 г. Мелколесье на загрязненной поверхности зазеленело и граница контура отступила на 150 м. Участок, где в 2018 г. наблюдался выброс солевого раствора, отличается менее темным, голубовато-фиолетовым цветом изображения.

Снимок «исторической линейки» GoogleEarth 7 августа 2020 г. показывает изменения через два года после разлива. Сплошной контур нефтезагрязненной территории начинается не от углового поворота трубопровода, как это было в 2019 г., а в двухстах метрах южнее; на этом крайнем северном участке сохранились лишь отдельные темные пятна между участками зеленой травянистой растительности и мелколесья.



В северной части ложбины поверхность остается покрытой нефтью, но на ее темном фоне видны зеленые пятна кустарника, а на крайнем западном участке восстановилось редколесье. В средней части ложбины, куда, видимо, распространились выплеснутые солевые растворы, редкие кусты сохранились, но они растут на оголенном грунте, а основной участок выплеска имеет светло-серый розоватый цвет и вообще лишен растительности. В южной части ложбины на фоне еще покрытого нефтью черного грунта выделяются зеленые пятна возобновляющегося редколесья. На участке выброса солевых растворов между двумя линиями трубопроводов появился искусственный контур круглой формы диаметром 10 м; возможно, здесь создан резервуар с водой для промывки грунта с целью рекультивационного рассоления территории. Восточнее ложбины примыкающий к ней участок между 5 линиями трубопроводов почти полностью лишен зеленой растительности, цвет грунта розоватый, как и на участках без растительности в средней части ложбины.

Снимок 8 июня 2022 г. показывает, что через 4 года после крупного разлива 2018 г. на части охваченных им территорий – на крайнем северном, северо-западном участках – происходит самовосстановление растительности, но при этом заметны новые прорывы трубопроводов в северную часть ложбины и излияния солевых растворов в ее южной части.

На снимке WV-3 25 августа 2022 г. прослеживаются дальнейшие изменения в ландшафте на месте нефтяного разлива 2018–2019 г. В северной части ложбины сильное нефтяное загрязнение поверхности сохранилось в ее восточной, примыкающей к трубопроводам половине. Здесь только отдельные группы крупных зеленых кустов

поднимаются над загрязненной поверхностью. В западной половине этого северного участка ложбины островки зеленой растительности составляют около 50% территории, а в северо-западной части ложбины травянисто-кустарниковая и мелколесная растительность полностью восстановилась. Хорошее восстановление характерно и для юго-западной части ложбины, где контур нефтяного разлива 2019 г. уже не виден. Существенные изменения произошли в юго-восточной и средней частях ложбины, где четко выделяется (темно-коричневым цветом на снимке в варианте синтеза SWIR1-NIR1-RedEdge) контур, очевидно, связанный с промыванием участков разлива выплеснутых ранее солевых растворов. На этом снимке видны в дополнение к отмеченному в 2020 г. резервуару с водой еще несколько новых. Темный контур промыва охватывает среднюю часть ложбины и участок между 5 линиями трубопроводов и дорог восточнее ложбины.

В целом на этом участке крупных разливов в 2018–2019 гг. как нефти, так и солевых растворов, следы разливов к 2022 г. сохраняются. В северной, северо-западной и крайней южной частях ложбины наблюдается частичное самовосстановление растительности после нефтяного загрязнения, а в средней части, подвергавшейся действию солевых растворов, проводятся рекультивационные обводняющие мероприятия по рассолению.

### **Нефтяной разлив № 2**

Участок расположен в 350 м западнее трассы Нижневартовск–Радужный, на пересечении полосы из 8 линий промысловых трубопроводов, идущей вдоль трассы западнее нее, с поперечной полосой из 3 линий промысловых трубопроводов.

Участок размером 130 × 250 м обрамлен с СЗ ограждением кустовой площадки, а с ЮВ и В линиями трубопроводов. Представляет собой выровненную поверхность, покрытую мохово-травянистой растительностью, с отдельными кустами и деревцами. Цвет и характер поверхности этого участка, судя по снимкам «исторической линейки» Google Earth, в том

числе снимкам 5 июня 2017 г. и 5 октября 2018 г., не отличались на изображении от соседних безлесных участков.

На снимке WV-3 1 июля 2019 г. в варианте синтеза SWIR1-NIR1-RedEdge (рис. 5а) контур нефтяного загрязнения выделяется среди аналогичных окружающих территорий красно-коричневым цветом.

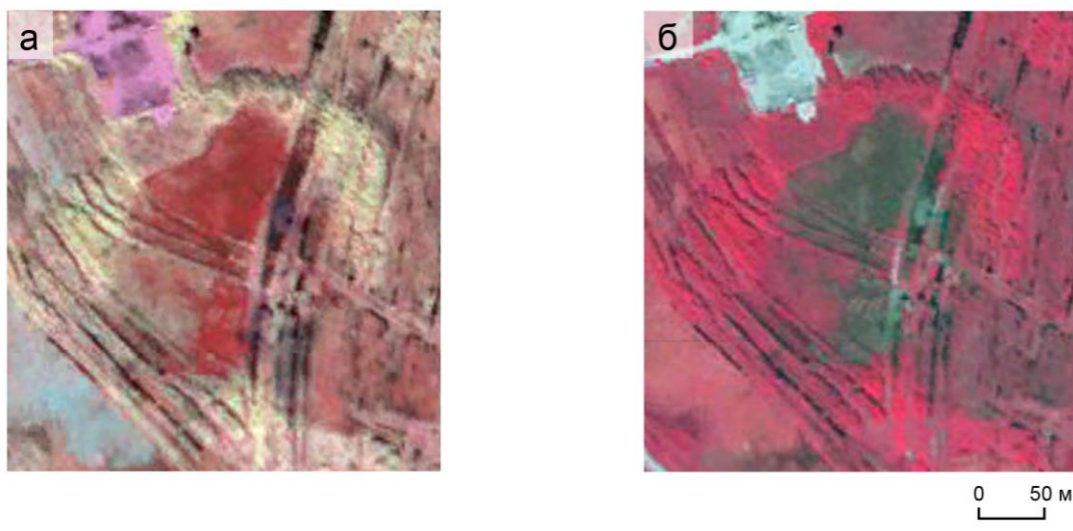


Рис. 5. Разлив № 2 на снимке WorldView 01.06.2019 в разных вариантах цветового синтеза: а – SWIR1-NIR1-RedEdge; б – NIR-Red-Green

В варианте синтеза NIR-Red-Green (рис. 5б) голубовато-серый цвет контура свидетельствует об отсутствии в нем зеленой растительности. Видны места примыкания контура к линии промышленного нефтепровода. Эти особенности, которые могут служить признаками нефтяного разлива, распространяются на всю северную часть контура и восточную половину южной части. Видно перекрытие предполагаемым разливом нескольких участков между линиями трубопровода. Площадь предполагаемого разлива – 17 680 м<sup>2</sup>.

На снимках «исторической линейки» Google Earth 7 августа 2020 г. и 8 июня 2022 г. (рис. 6) при синтезе в естественных цветах поверхность в пределах всей северной части этого контура и восточной половины южной части контура, а также между

ближайшими линиями трубопроводов, имеет черный цвет, что подтверждает наличие нефтяного разлива; на черном фоне загрязненной поверхности выделяются зеленые кроны кустов. В южной части контура темных пятен на поверхности меньше.

На снимке WV-3 25 августа 2022 г. в варианте синтеза SWIR1-NIR1-RedEdge северная часть контура слабо выделяется по светло-коричневому цвету среди аналогичных безлесных территорий, а южная почти не выделяется. Очевидно, этот нефтяной разлив слабее воздействовал на ландшафты, происходит их самовосстановление, в результате контур разлива дешифрируется менее уверенно. Но снимок 8 июня 2022 г. в Google Earth подтверждает наличие недавнего разлива.



Рис. 6. Разновременные снимки территории нефтяного разлива № 2 (пояснения в тексте)

### Нефтяной разлив № 3

Участок находится в 6 км к ЮВ от оз. Сомотлор, в районе после поворота на север трассы Нижневартовск–Радужный, в 1,1 км западнее и в 1,6 км севернее трассы. Расположен в зоне перекрестья широкой просеки с системой трубопроводов, идущей в направлении ЮЗ-СВ, и пересекающей ее дороги с трубопроводом в направлении ЮВ-СЗ. Занимает обширное пространство размером  $170 \times 350$  м между лесными массивами взрослого смешанного леса. Площадь, занятая разливом, –  $82\,134$  м<sup>2</sup>.

На снимке WV-3 1 июля 2019 г. в варианте синтеза SWIR1-NIR1-RedEdge (рис. 7а) весь контур участка в целом имеет коричнево-фиолетовый

цвет, что может служить признаком разлива. При этом аморфная структура изображения, обусловленная использованием зоны SWIR с пониженным разрешением 3,7 м, не позволяет выявить характер растительности. Лишь в СВ и ЮВ частях контура видны участки светло-серого цвета, на которых крупнопятнистая структура изображения крон указывает на наличие взрослого леса. Вдоль трубопровода, идущего на СЗ к кустовой площадке, тянутся темно-коричневые, почти черные полосы. В прошлом в этих понижениях стояла вода, но на этом снимке видно несколько точек соединения труб с пятном разлива – предположительно, это нефть.

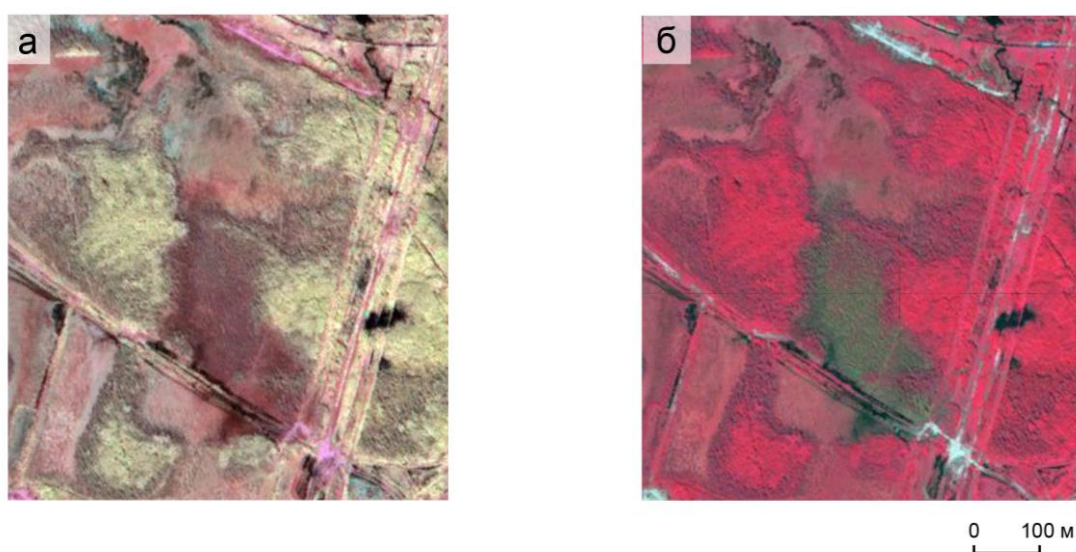


Рис. 7. Разлив № 3 на снимке WorldView 01.06.2019 в разных вариантах цветового синтеза: а – SWIR1-NIR1-RedEdge; б – NIR-Red-Green

Другой возможный источник разлива в северную часть контура заметен на одной из труб системы трубопроводов ЮВ-СЗ направления.

На том же снимке в варианте синтеза NIR-Red-Green (рис. 76) подтверждается отсутствие зеленой растительности на всем этом участке – контур деградированной растительности достаточно четко выделяется благодаря голубовато-серому цвету среди окружающих ярко-розовых лесов и серо-розовых безлесных участков с низкорослой травянистой растительностью. В этом варианте синтеза в южной части контура более четко видны источники загрязнения, распространяющегося в обе стороны от двух спаренных труб.

На снимках высокого разрешения в Google Earth в варианте синтеза с естественной цветопередачей при использовании «исторической линейки» хорошо прослеживается изменение характера изображения в этом контуре до и после разлива. Как видно на снимке 5 июня 2017 г. (рис. 8), большая часть участка была занята прямоугольной делянкой лесопосадок размером 160 × 230 м – молодым лиственным лесом с ровным пологом небольших по размеру крон, обусловивших мелкозернистую структуру изображения. В юго-восточной и северо-восточной частях на этот контур заходили участки взрослого леса, такого же, как на окружающих массивах (возможно, хвойного, о чем свидетельствуют зимние снимки 7 апреля 2016 г.).

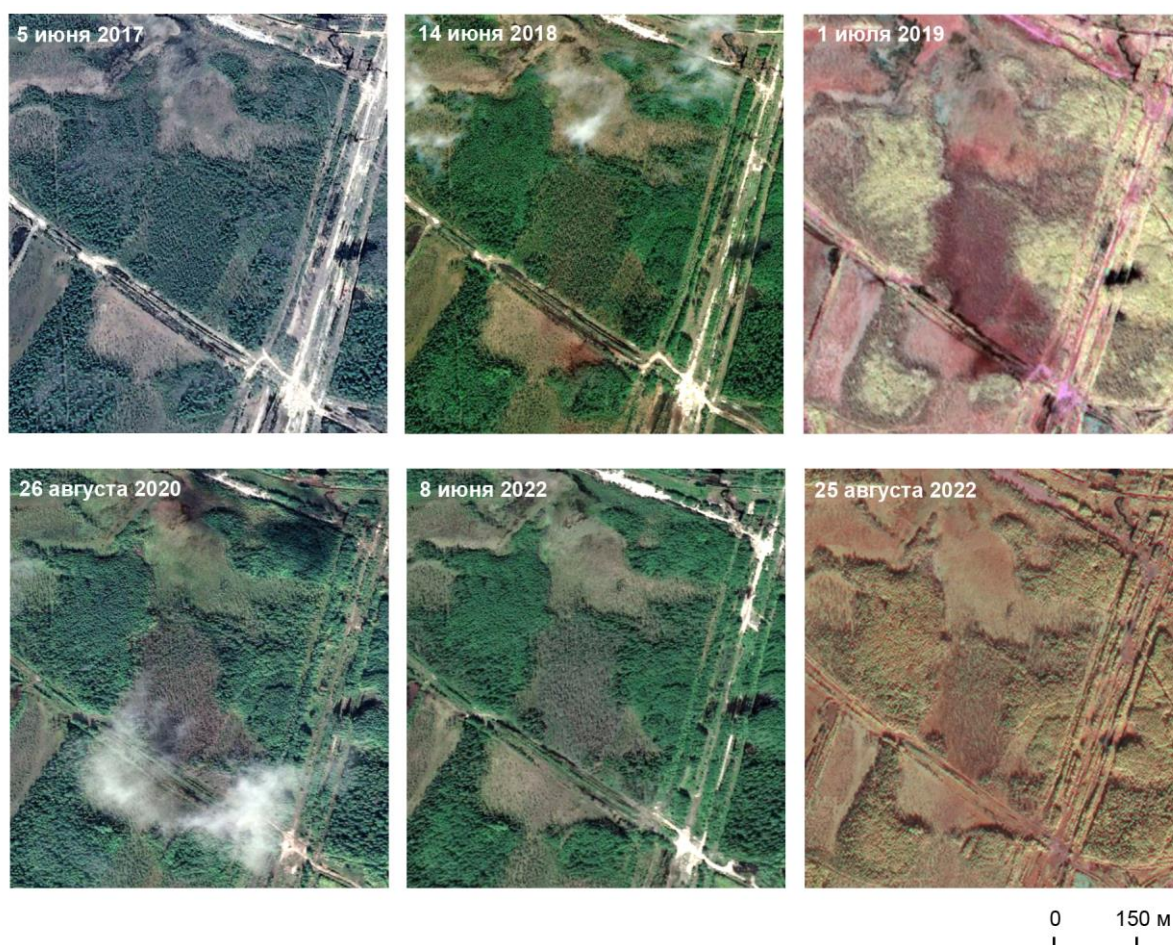


Рис. 8. Разновременные снимки территории нефтяного разлива № 3 (пояснения в тексте)

На снимке 14 июня 2018 г., при сохранившейся мелкозернистой структуре и зеленом цвете изображения крон молодого леса, коричневый цвет поверхности между кронами выделяет контур, очевидно, произошедшего нефтяного разлива, источники которого заметны на обоих трубах ЮВ-СЗ направления, особенно на южной трубе, где хорошо видно коричневое пятно деградировавшей травянистой растительности. Общий контур произошедшего разлива четко повторяется на снимке WV-3 1 июля 2019 г., где к нему добавляется на севере участок с разливом из средней трубы системы трубопроводов ЮЗ-СВ направления. Изменение структуры изображения молодого леса в пределах разлива на этом снимке проследить не удастся в связи с пониженным разрешением снимка SWIR-зоны, а на участках взрослого леса в ЮВ и СВ частях контура между кронами деревьев просвечивает загрязненная поверхность.

На снимке 26 августа 2020 г., на не закрытом облачностью участке, заметно изменение структуры изображения молодого леса после разлива – вместо сплошного мелкозернистого зеленого полога крон появилась полосчатая структура изображения стволов начавшего усыхать леса и их теней. На снимке 8 июня 2022 г. весь прямоугольный контур бывшей делянки молодого леса выделяется среди остальных лесных массивов полосчатой структурой изображения оголенных стволов и их теней серо-фиолетового цвета, однако в северной части делянки уже заметно зеленое восстановление. На безлесном участке разлива южнее трубопровода поверхность остается без зелени, видны редкие усохшие кусты. На участках охваченного разливом взрослого леса изменения мало заметны и состоят в отсутствии зелени в просветах между кронами.

На снимке WV-3 25 августа 2022 г. в варианте синтеза SWIR1-NIR1-RedEdge характеризуемый контур нефтяного разлива 2018 г. по цвету мало заметен, но его выделяет полосчатая структура изображения сухостоя, которая в северной части бывшей делянки с молодым лесом постепенно замещается мелкопятнистой структурой изображения восстанавливающегося мелколесья. Однако на том же снимке в варианте синтеза из трех зон среднего инфракрасного диапазона SWIR1-SWIR4-SWIR8 наиболее усохшая часть контура выделяется среди окружающих оранжево-коричневых лесных массивов серо-фиолетовым цветом.

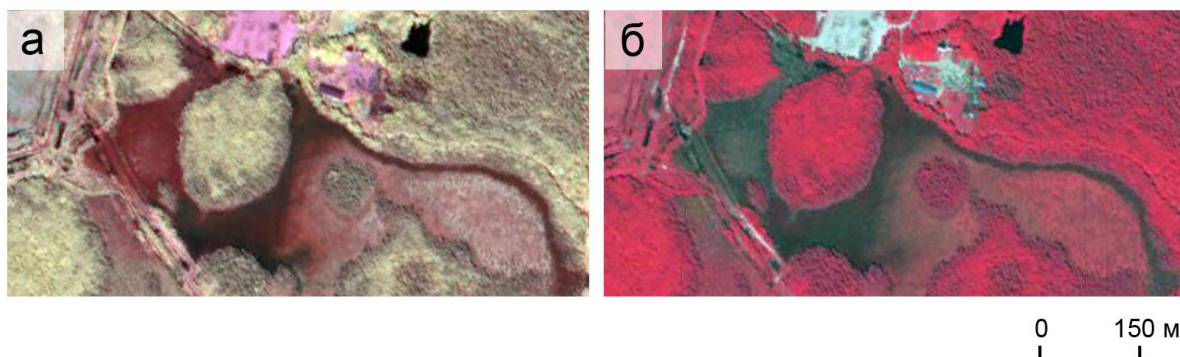
В целом для этого участка нефтяного разлива 2018 г., где разлив вызвал усыхание молодых лесопосадок, характерно постепенное самовозобновление, позеленение крон через 3–4 года после разлива.

#### **Нефтяной разлив № 4**

Участок находится в районе поворота на север трассы Нижневартовск–Радужный, на расстоянии 800 м севернее трассы. Расположен южнее кустовой площадки и находящегося рядом с ней предприятия. Кустовая площадка обрамлена трубопроводом. Большая часть участка представляет собой лишенную леса территорию с травянисто-кустарниковой растительностью, окаймленную лесными массивами. Имеет сложную конфигурацию, состоит из двух безлесных участков конусообразной формы, разделенных лесным массивом округлой формы. Западный более компактный конусообразный участок имеет размеры 200 м в направлении СВ-ЮЗ при ширине от 30 до 150 м, восточный участок примерно таких же размеров не имеет четкой ЮВ границы. Площадь разлива в 2018 г. на этом участке – 57 137 м<sup>2</sup>.

На снимке WV-3 1 июня 2019 г. в варианте синтеза SWIR1-NIR1-RedEdge (рис. 9а) фиолетово-коричневый цвет

изображения соответствует полной деградации растительности, что указывает на возможность нефтяного разлива.



**Рис. 9.** Разлив № 4 на снимке WorldView 01.07.2019 в разных вариантах цветового синтеза: а – SWIR1-NIR1-RedEdge; б – NIR-Red-Green

Деградация растительности подтверждается снимком в варианте синтеза NIR-Red-Green (рис. 9б), где голубовато-серый цвет этого участка резко контрастирует с ярко-розовыми лесными массивами. Вероятный источник разлива – трубопровод,

окаймляющий кустовую площадку севернее участка.

«Историческая линейка» в Google Earth позволяет проследить трансформацию растительности на этой территории, наиболее четко выявляемую на западном конусе (рис. 10).



**Рис. 10.** Разновременные снимки территории нефтяного разлива № 4 (пояснения в тексте)

Снимок 11 марта 2014 г. со снежным покровом показывает, что верхняя часть этого конуса была занята лесом, лесной массив округлой формы между конусами соединялся с окружающими

лесными массивами, а средняя и нижняя часть западного конуса были заняты кустарниками и мелколесьем; поверхность восточного конуса занята разреженными кустарниками.

Снимок 14 мая 2014 г. подтверждает наличие древесной растительности в верхней части западного конуса и разреженного мелколесья в его нижней части. Та же ситуация сохранялась в последующие годы и хорошо отобразилась на снимке *26 августа 2016 г.*, когда примыкающая к трубопроводу северная верхняя часть контура западного конуса была занята густым лесом, хорошо видна крупнозернистая структура изображения крон, цвет их зеленый; нижняя часть контура занята кустарниками и разреженным мелколесьем.

На снимке *5 июня 2017 г.* картина изменилась. В разделяющем конусы округлом лесном массиве, видимо, проведены рубки ухода, либо рубки под сейсморазведочные работы и этот массив приобрел крупнополосчатую структуру. Исчезла и полоса густого леса в верхней части западного конуса, а по обоим краям этого конуса в его средней части появились темные полосы и пятна, возможно, нефтяного загрязнения поверхности, так же как и на краях восточного конуса, а на фоне этих пятен видны еще зеленые кустарники.

Существенные изменения отмечаются на снимке *14 июня 2018 г.*, где на фоне окружающих зеленых лесов и кустарников резко выделяется коричневым цветом деградировавшая растительность обоих конусов, охваченных предшествующими нефтяными разливами. В верхней части западного конуса зафиксирован сухостой – видны коричневые стволы деревьев без крон, подстилающая поверхность без зелени. Этот контур погибшего леса четко ограничен сверху линией трубопровода. При предположении о возможной пирогенной причине изменений остается вопрос – почему контур пожара четко привязан к трубопроводу, но не распространяется на

соседние лесные массивы. В качестве очевидной причины гибели леса рассматривается нефтяной разлив, или разливы, происходившие между июнем 2017 г. и июлем 2018 г.

Ниже по конусу, в зоне мелколесья, видны также сухие стволы и кроны отдельных деревьев и кустов, травянистая растительность деградирована, цвет поверхности фиолетово-коричневый. Изменения цвета поверхности произошли и на соседнем восточном конусе, особенно в его западной части, а от его вершины протянулась более чем на 500 м длинная узкая (шириной 10–30 м) полоса деградировавшей растительности вдоль ложбины водотока, по которой распространялось и нефтяное загрязнение. Поворачивая на ЮЗ, эта полоса вторгается в прилегающий лесной массив, в котором также заметны деградационные изменения (см. рис. 9).

Именно последствия этого разлива отразились на снимке *WV-3 1 июля 2019 г.*, где в варианте синтеза SWIR1-NIR1-RedEdge четко выделяющийся фиолетово-коричневый контур повторяет очертания разлива 2018 г., а в нижней части западного конуса выходит за его пределы, перекрывая участок подходящих с юга дорог и трубопроводов.

На снимке «исторической линейки» *26 августа 2020 г.* весь контур предполагаемого разлива остается без зеленой растительности. И только в 2022 г., через 5 лет после разлива, возможно, неоднократного, на снимке *8 июня 2022 г.* видно происходящее позеленение поверхности на участке разлива – появление отдельных зеленых деревьев среди сухостоя в погибшем лесу, зеленого мелколесья и кустарников на все еще загрязненной поверхности обоих конусов.

На снимке WV-3 25 августа 2022 г. в варианте синтеза SWIR1-NIR1-RedEdge контур этого разлива не очень сильно выделяется среди остальных беслесных контуров коричневым цветом, но в его пределах отмечаются изменения. В вершине западного конуса, где после разлива 2018 г. лес усох, видны зеленеющие кроны молодого возобновления. Продолжается общее позеленение поверхности беслесных частей обоих конусов, особенно заметное на восточном конусе, где восточная граница бывшего разлива размыта. С другой стороны, на нескольких участках отмечается расширение зоны влияния нефтяного разлива за пределы его видимого в 2019 г. контура. В нижней части западного конуса эта граница переместилась западнее системы дорог и трубопроводов. Другой участок расширения зоны влияния – у окончания узкого потока, протягивавшегося от восточного конуса: удлинилась зона его вторжения в лесной массив.

В целом на этом примере удастся проследить как губительное воздействие нефтяного разлива – гибель взрослого леса, так и начинающееся восстановление лесной растительности через 4–5 лет после разлива.

### **Обсуждение результатов**

Выполненные исследования позволяют сделать выводы в двух различных направлениях. Первое связано с возможностью выявления нефтяных разливов дистанционными методами, с дешифрированием по космическим снимкам участков, охваченных нефтяными разливами, и выявлением влияния разливов на экосистемы этих участков. Второй аспект связан с особенностями воздействия нефтяных разливов на природу, его проявлением в разных ландшафтных

условиях, длительностью и степенью губительного влияния на растительность, скоростью ее восстановления после повреждения и гибели.

По первому направлению – дистанционного определения разливов – в проведенном эксперименте впервые выявлены признаки для дешифрирования нефтяных разливов по многоспектральным космическим снимкам сверхвысокого разрешения, полученным с участием среднего инфракрасного диапазона съемки – SWIR-диапазона. Цвет нефтяного загрязнения на изображениях может быть связан с особенностями спектрального отражения нефтью солнечного излучения в SWIR-диапазоне. На используемых авторами снимках WorldView-3 в варианте синтеза SWIR1-NIR1-RedEdge – это коричнево-фиолетовый цвет, отличающий ее от окружающих объектов. Этот признак пока не изучен количественно (параметры цвета и его варианты, их соотношение с характеристиками объекта), он получен при опробовании в цветовом синтезе лишь одной из восьми SWIR-зон. Достоверность его пока не определена и на этом этапе он обеспечивает лишь предположительное дешифрирование, для увеличения достоверности которого в предложенной методике используется обращение к многовременным снимкам высокого разрешения, предоставляемым «исторической линейкой» информационной системы Google Earth. Такая предварительно разработанная методика визуального дешифрирования позволила выявить и детально проанализировать ландшафтные изменения нескольких участков крупных нефтяных разливов, проследив на их примере особенности деградации различных типов растительности.



В то же время остается актуальной задача разработки методики дешифрирования нефтяных разливов по снимкам WorldView-3 с более полным использованием информации всех спектральных диапазонов на основе автоматизированного дешифрирования.

Второе направление результатов выполненного визуального дешифрирования и проведенного анализа серий разновременных снимков выборочных нефтяных разливов – экологическое. Расположение проанализированных участков разливов в различных ландшафтных условиях, на территориях с развитием травянисто-кустарничковой, кустарниковой, мелколесной (включая подрост лесопосадок) и лесной растительности, а также наблюдения за ее изменениями непосредственно после разлива и в течение нескольких последующих лет, дает возможность проследить реакцию различных фитоценозов на нефтяное загрязнение, продолжительность периода их деградации и время самовосстановления.

Представляет интерес сопоставление этих наблюдений с приводимыми в литературе результатами исследований реакции биоты наземных экосистем на нефтяное загрязнение. В монографии А.В. Сороматина о воздействии добычи нефти на экосистемы Западной Сибири [9] отмечается видоспецифичный характер реакции экосистем. Наиболее толерантны к нефтяному загрязнению гидрофильные растения, что определяет лучшую сохранность исходной растительности и ее более быстрое восстановление на заболоченных и околородных участках [10]. Среди разливов, охарактеризованных в нашем исследовании, таких, приходящихся на низовые болота, нет; возможно, указанные свойства определяют и их более слабую дешифрируемость на космических снимках.

На участках же верховых болот и суходолов признаки нефтяного воздействия сохраняются дольше, а самовосстановление фитоценозов растягивается на многие годы и даже десятилетия [11].

Наибольшие по площади разливы имеют место в районах с общей выравненностью рельефа и характеризуются обширным растеканием нефти от места прорыва трубопровода, но незначительным проникновением загрязнителя в глубину почвенного профиля [12]. Именно таковы рассмотренные нами участки разливов. Охватывая достаточно полный ряд жизненных форм растений от травянисто-кустарничковой, кустарниковой, до лесной растительности, они позволяют проследить специфику воздействия на них и их самовосстановления.

Для различных видов растительности характерна разная реакция на нефть: лиственные породы древесных растений по сравнению с хвойными более устойчивы к нефтяному загрязнению. Наибольшую устойчивость к нему проявляет береза (высотой более 0,5 м). Устойчивость растений травяно-кустарничкового яруса ниже, чем растений древесного и кустарничкового яруса из-за неглубокого проникновения корневой системы [13]. Из травянистых растений злаки, осоки, ситниковые более устойчивы, чем мхи и таежное мелкотравье [9].

Многие из этих закономерностей, выявленных западно-сибирскими исследователями на основе специальных экспериментов и многолетних полевых наблюдений, подтверждаются при анализе разновременных космических снимков. На большей части участков разливов, исследованных в настоящей работе, преобладает травянисто-кустарничковая и кустарничковая растительность (участки № 1, 2, 4).

Черный цвет покрытой нефтью поверхности с деградировавшей травянистой растительностью (а на снимках, синтезированных с участием SWIR-зоны – темный коричнево-фиолетовый) после разлива сохраняется, но через 1–2 года на его фоне появляются зеленые пятна возобновляющихся кустарников. Однако общие контуры этих разливов, произошедших в 2017–2018 г. (в том числе неоднократных), выделяются среди не охваченного нефтяным загрязнением окружения даже на снимках 2022 г., сохраняясь, таким образом, в течение 4–5 лет. Однако, развитие кустарников способствует менее четкому выделению таких контуров (например, участка № 2, восточного конуса участка № 4).

Некоторые из разливов охватили и территории, занятые низкорослым березовым мелколесьем. Например, на участке № 1 оно развито на западной окраине северной части ложбины этого участка и в юго-западной части этой ложбины. Мелколесье, а вернее делянка молодого саженного леса, составляет большую часть территории участка № 3. В этих случаях нефтяная поверхность разлива бывает скрыта под густым пологом сомкнутых крон молодых деревьев и лишь просвечивание сквозь листву и разрывы между кронами обуславливает особый цвет изображения таких участков – придает коричневатый оттенок зеленому цвету леса на снимках в естественном варианте синтеза, а на снимках, синтезированных с участием SWIR-зоны, обуславливает светлый коричневато-фиолетовый цвет. Разлив вызывает деградацию растительности, увядание листвы и дальнейшее усыхание древостоя. На участке № 3 после разлива 2018 г. оно проявилось через 2 года, но уже в 2020 г. в северной части контура на деревьях появилась зеленая листва, а к 2022 г. зеленое

возобновление охватило почти всю делянку. Однако общий контур недавнего разлива в это время продолжает выделяться из-за недостаточного возобновления растительности наземного яруса.

Лесная растительность в нашем исследовании была представлена на территории участка № 4, где ее гибель послужила главным признаком произошедшего разлива. Подходивший к трубам промыслового нефтепровода густой лес после разлива 2017 г. и 2018 г. превратился в мертвый сухостой на полностью загрязненной нефтью поверхности. Но уже в 2020 г. кроны деревьев стали выборочно зеленеть, хотя поверхность под ними оставалась загрязненной, а в 2022 г., через 4 года после разлива, позеленение охватило большую часть крон. Это вполне соответствует заключению тюменских специалистов о том, что при аварийных разливах деградационные изменения древостоя обычно заканчиваются в течение 2–3 лет [12].

Таким образом, результаты исследований, проведенных по космическим снимкам, хорошо согласуются с натурными наблюдениями специалистов, подтверждая необходимость разработки методов дешифрирования снимков, полученных с использованием SWIR-диапазона, на основе их автоматизированной обработки.

### **Выводы**

1. Предложена предварительно разработанная методика визуального дешифрирования нефтяных разливов на снимках WorldView-3 по цветным изображениям, синтезированным при участии SWIR-зоны, с проверкой по разновременным снимкам высокого разрешения в системе Google Earth.

2. На примере выявленных на основе предложенной методики крупных нефтяных разливов Самотлорского месторождения прослежены изменения поверхности на участках с травянисто-кустарничковой, мелколесной и лесной растительностью; выявленные изменения хорошо сопоставимы с данными наземных полевых исследований, содержащимися в литературных источниках.

3. Выполненное исследование показывает необходимость дальнейшей разработки методов дистанционного мониторинга нефтяных разливов с использованием SWIR-диапазона, включая автоматизированную обработку информации.

*Работа выполнена в рамках государственного задания (тема «Развитие методов и технологий картографии, геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях природы и общества»).*

#### Литература

1. Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / Под ред. акад. В.Г. Бондура. М.: Научный мир, 2012. 558 с.
2. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследования Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
3. Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н. Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 6. С. 64–73.
4. Корниенко С.Г. Особенности трансформации растительности на территории Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6, № 2. С. 394–399.
5. Абросимов А.В., Беленов А.В., Брагин Е.А. Совместный проект компании «Совзонд» и ГП НАЦРН им. В.И. Шпильмана – новое слово в космическом контроле недропользования и природопользования // Геоматика. 2009. № 4. С. 64–79.
6. Cloutis E.A. Spectral reflectance properties of hydrocarbons: remote-sensing implications // Science. 1989. Vol. 245, No. 4914. P. 165–168. <https://doi.org/10.1126/science.245.4914.165>
7. Hörig B., Kühn F., Oschütz F., Lehmann F. HyMap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons // International Journal of Remote Sensing. 2001. Vol. 22, No. 8. P. 1413–1422. <https://doi.org/10.1080/01431160120909>
8. Астанов А.П., Брадучан Ю.В., Боровский В.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская.

Работы в этом направлении будут способствовать решению важнейшей задачи обеспечения оперативного дистанционного мониторинга нефтяных разливов.

#### Благодарности

Авторы выражают благодарность Кембриджскому университету за содействие в оснащении космическими снимками, а также магистру геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова И.Н. Пижанкову за предоставление материалов полевого обследования региона.

Лист Р-43-Сургут. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. 342 с.

9. *Соромотин А.В.* Воздействие добычи нефти на таежные экосистемы Западной Сибири. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2010. 320 с.

10. *Гашева М.Н., Гашев С.Н., Соромотин А.В.* Состояние растительности как критерий нарушенности лесных биоценозов при нефтяном загрязнении // Экология. 1990. № 2. С. 77–78.

11. *Зубайдуллин А.А.* Самовосстановление нарушенных фитоценозов на нефтезагрязненных участках суходолов и верховых болот // Наука и образование ХМАО – XXI веку: Сб. тез. докл. окруж. конф. молодых ученых и специалистов. Сургут: Изд-во СурГУ, 2000. С. 23–26.

12. *Чижев Б.Е.* Лес и нефть Ханты-Мансийского автономного округа. Тюмень: Изд-во Ю. Мандрики, 1998. 144 с.

13. *Московченко Д.В.* Нефтегазодобыча и окружающая среда. Эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск: Наука, Сиб. предприятие РАН, 1998. 112 с.

## Study of the evolution of oil spill sites based on high-resolution satellite images: the case of the Samotlor field

V.I. Kravtsova\*, M.V. Zimin

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

E-mail: \*valentinamsu@yandex.ru

**Abstract.** A methodology for visual interpretation of accidental oil spills using satellite images from the WorldView-3 satellite equipped with short-wave infrared (SWIR) channels is proposed, with verification using multi-temporal very-high-resolution images in the Google Earth system. The analysis of the images of four large oil spills in the southeastern part of the Samotlor field made it possible to study the degradation changes in different types of vegetation and the processes of its self-recovery for 2017–2022. The comparison of the results of image analysis with the data from field studies reveals their good agreement and the need for further development of methods for remote monitoring of oil spills using the SWIR range.

**Keywords:** satellite imagery, SWIR range, high resolution, interpretation, multi-temporal analysis, oil spills, vegetation degradation, self-recovery.

**Citation:** *Kravtsova V.I., Zimin M.V.* Study of the evolution of oil spill sites based on high-resolution satellite images: the case of the Samotlor field // Actual Problems of Oil and Gas. 2023. Iss. 1(40). P. 45–66. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2023-40.art5> (In Russ.).

### References

1. Aerospace monitoring of objects of the oil and gas complex / Ed. by Academician V.G. Bondur. Moscow: Nauchnyi Mir, 2012. 558 p. (In Russ.).
2. *Bondur V.G.* Aerospace methods and technologies for monitoring of oil and gas areas and facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. Vol. 47, No. 9. P. 1007–1018. <https://doi.org/10.1134/S0001433811090039>
3. *Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N.* Remote sensing of vegetation by optical microwave methods // *Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2008. No. 6. P. 64–73. (In Russ.).
4. *Kornienko S.G.* Feature of transformation of vegetation on the territories of Urengoy's oil and gas deposit // *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2009. Vol. 6, No. 2. P. 394–399. (In Russ.).
5. *Abrosimov A.V., Belenkov A.V., Bragin E.A.* The joint project of the Sovzond company and NACRN V.I. Shpilmana – a new word in the space monitoring of resources and wildlife management // *Geomatics*. 2009. No. 4. P. 64–79. (In Russ.).
6. *Cloutis E.A.* Spectral reflectance properties of hydrocarbons: remote-sensing implications // *Science*. 1989. Vol. 245, No. 4914. P. 165–168. <https://doi.org/10.1126/science.245.4914.165>
7. *Hörig B., Kühn F., Oschütz F., Lehmann F.* HyMap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons // *International Journal of Remote Sensing*. 2001. Vol. 22, No. 8. P. 1413–1422. <https://doi.org/10.1080/01431160120909>
8. *Astapov A.P., Braduchan Yu.V., Borovsky V.V.* et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Series West Siberian. Sheet P-43-Surgut. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI Mapping Factory, 2012. 342 p. (In Russ.).

9. *Soromotin A.V.* The impact of oil production on the taiga ecosystems of Western Siberia: monograph. Tyumen: Tyumen State University, 2010. 320 p. (In Russ.).

10. *Gasheva M.N., Gashev S.N., Soromotin A.V.* The state of vegetation as a criterion for the disturbance of forest biocenoses in case of oil pollution // *Ekologiya*. 1990. No. 2. P. 77–78. (In Russ.).

11. *Zubaidullin A.A.* Self-restoration of disturbed phytocenoses in oil-contaminated areas of dry valleys and raised bogs // *Science and education of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – 21<sup>st</sup> century: Collected abstracts of the District Conference of Young Scientists and Specialists*. Surgut: Surgut State University, 2000. P. 23–26. (In Russ.).

12. *Chizhov B.E.* Forest and oil of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. Tyumen: Yu. Mandrika, 1998. 144 p. (In Russ.).

13. *Moskovchenko D.V.* Oil and gas production and the environment. Ecological and geochemical analysis of the Tyumen region. Novosibirsk: Nauka, Siberian Enterprise of the Russian Academy of Sciences, 1998. 112 p. (In Russ.).