

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗОЛОТОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ КРИОЛИТОЗОНЫ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ (НА ПРИМЕРЕ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ)

© 2023 г. П. Г. Илюшина^{a, c}, А. Н. Шихов^{b, c, d, *}, О. М. Макарьева^c

^aГеографический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^bПермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

^cИнститут наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

^dКазанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

*E-mail: and3131@inbox.ru

Поступила в редакцию 27.08.2022 г.

Золотодобыча на рудных и россыпных месторождениях сопровождается значительным воздействием на природную среду криолитозоны, в частности нарушением земель и загрязнением рек взвешенными веществами. В настоящей работе рассматривается методика идентификации и картографирования негативного воздействия золотодобывающих предприятий на природную среду на основе многолетнего ряда открытых спутниковых данных Landsat и Sentinel-2. Исследование проведено на примере Тенькинского, Сусуманского и Ягоднинского районов Магаданской области, в пределах которых расположены крупнейшие золоторудные месторождения. Выявлены дешифровочные признаки участков действующих разработок и ранее отработанных участков, на которых начинается восстановление растительности. На основе экспертного дешифрирования и анализа значений NDVI установлено, что около 2% площади района исследования нарушены в результате золотодобычи, из них только на 10% наблюдаются процессы восстановления растительного покрова. В Тенькинском районе выявлено увеличение площади нарушенных земель за период 2001–2021 гг. более чем в 7 раз, что связано со значительным увеличением объемов золотодобычи. С применением модуля C2RCC программного пакета SNAP оценено содержание взвешенных веществ в воде рек Берелёх, Аян-Юрях и Колыма (которые подвергаются наиболее интенсивному загрязнению), в сравнении с фоновыми значениями. Установлено, что основным источником загрязнения рек взвешенными веществами являются разрабатываемые россыпные месторождения золота в пойме р. Берелёх. При этом сезонная изменчивость загрязнения определяется гидрологическими условиями (мутность уменьшается в период межени и растет при высоких уровнях воды).

Ключевые слова: золотодобыча, нарушение земель, загрязнение водотоков, взвешенные вещества, Landsat, Sentinel-2, NDVI, Магаданская область

DOI: 10.31857/S0205961423010050, **EDN:** MMJKJQ

ВВЕДЕНИЕ

Золотодобыча на рудных и россыпных месторождениях сопровождается значительным воздействием на природную среду, в частности загрязнением рек взвешенными веществами (Чупаченко, 2020; Gallo Corredor et al., 2021) и тяжелыми металлами (Радомская, Радомский, 2014; Jarsjö et al., 2017), нарушением земель, в том числе обезлесением и изъятием сельскохозяйственных угодий (Schueler et al., 2011). В регионах с суровым климатом и сплошным распространением многолетней мерзлоты, к числу которых относится Северо-Восток России, восстановление ландшафтов на нарушенных участках занимает продолжительное время, что усугубляет перечисленные

проблемы. Это связано с существенным изменением геоэкологических условий нарушенных полигонов, антропогенным изменением таликовых зон и процессов водообмена в долинах рек. Экологическое состояние нарушенных ландшафтов определяется характером проявления криогенных процессов – термокарста, солифлюкции, морозного пучения (Иванов, 2013).

Магаданская область занимает первое место в России по добыче россыпного золота (Добыча..., 2022). Объем добычи увеличился с 14.5 т. в 2013 г. до 19.8 т. в 2021 г., что ведет к обострению существующих экологических проблем. По объему добычи рудного золота наблюдался еще более значительный рост (в 4.5 раза за 8 лет). С учетом зна-

чительной площади нарушенных земель, возрастает необходимость их регулярного спутникового мониторинга, а также оценки восстановления растительного покрова на ранее обработанных участках месторождений. При этом следует учитывать, что процессы восстановления на отвалах, сформированных в результате дражной золотодобычи, протекают существенно дольше, чем на обычных отвалах, сформированных при разработке карьерным способом. В случае карьерной добычи грунт, который снимается с поверхности, содержит в себе семена растений — представителей местной флоры. Как только процесс разработки останавливается, начинается процесс восстановления растительности. В случае дражной золотодобычи мелкозернистый грунт, который является наиболее благоприятным для восстановления растительности, погребается под гравийной, хорошо промытой смесью, не содержащей никаких семян (Беликович, 2001).

Также при золотодобыче в реки поступают значительные объемы взвешенных веществ, которые распространяются вниз по течению на десятки и сотни км от источников — перерабатываемых драгой участков русел и пойм. Выявление и оценка масштабов загрязнения водотоков в труднодоступных районах также возможна по спутниковым снимкам, (Чупаченко, 2020). Данные наземного мониторинга загрязнения вод, связанного с золотодобычей, крайне ограничены ввиду редкости сети гидропостов, на большинстве которых не производятся измерения концентрации взвешенных веществ и мутности воды.

С учетом перечисленных проблем, цель настоящей работы состоит в выявлении дешифровочных признаков и картографировании нарушения земель и загрязнения водных объектов золотодобывающими предприятиями Магаданской области по многолетним рядам спутниковых снимков Landsat и Sentinel-2.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Оценка нарушения земель и восстановления растительного покрова. В качестве области исследования были выбраны долины рек Сусуман, Берелёх и Колыма в пределах Сусуманского, Тенькинского и Ягоднинского районов Магаданской области (рис. 1). В долине р. Берелёх расположены крупнейшие месторождения россыпного золота (Страницы истории..., 2018), вследствие активной разработки которых обширные участки земель нарушены золотодобычей.

Анализ динамики нарушенности земель выполнен по многолетнему архиву данных со спутников серии Landsat (сенсоров TM, ETM+, OLI), путем расчета нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI. Из архива были

отобраны безоблачные изображения за 2000, 2001, 2009–2011, 2013–2021 гг. уровня обработки Level2 (с выполненной атмосферной коррекцией). Такой набор наблюдений позволяет в полной мере проследить развитие процессов нарушения земель на изучаемой территории. Сплошное покрытие безоблачными изображениями для каждого года создать не удалось.

Выбор NDVI для анализа нарушения земель обусловлен тем, что он позволяет успешно выделить участки открытого грунта, для которых значения индекса близки к нулю, от участков, покрытых растительностью (Ding et al., 2016). Помимо NDVI, применяются другие критерии для обнаружения нарушенных земель по снимкам оптического диапазона, в частности повышенная температура поверхности нарушенных участков (Краснощеков и др., 2022), или низкие значения нормализованного разностного водного индекса NDWI, указывающие на низкую влажность поверхности нарушенных земель в сравнении с ненарушенными (Корниенко, 2022). В настоящей работе применение этих критериев было нецелесообразным, т.к. тепловые каналы Landsat имеют более низкое пространственное разрешение, чем данные в видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах, а также на нарушенных участках широко распространены техногенные водоемы (что не позволяет применять NDWI). Выделение нарушенных земель в настоящей работе производилось на основе пороговых значений NDVI, которые определялись для каждого изображения отдельно. Важно отметить, что помимо земель, нарушенных в результате золотодобычи, низкие значения NDVI имеют другие участки, лишенные растительности, в частности курумы и отмели на реках. Для исключения таких участков, результат автоматизированного выделения редактировался экспертным путем.

Анализ динамики NDVI позволяет выявить новые участки нарушения земель, связанные с золотодобычей и лишенные растительности, а также проследить процесс зарастания для обработанных участков. В работе выполнен расчет разностей значений NDVI между покрытиями за 2001, 2009/2010 и 2021 гг. для ряда ключевых районов. Из значений за 2009/2010 г. вычитались значения 2001 г., а из значений 2021 г. — значения 2009/2010 и 2001 гг. Отрицательные значения полученных разностей соответствуют нарушенным в ходе добычи землям. На их основе было проведено маскирование таких участков. В качестве порогового значения при создании маски изменений использовалось значение разности NDVI менее -0.05 .

Также были использованы снимки высокого пространственного разрешения с открытых картографических сервисов, по которым выделены



Рис. 1. Географическое положение ключевого участка.

дешифровочные признаки участков активной золотодобычи (рис. 2, а) и отработанных участков (рис. 2, б). Для действующих участков характерны признаки появления новых отвалов (разный оттенок отвалов породы на синтезированных изображениях); развитая дорожная сеть в пределах участка с признаками активного использования (отсутствие следов зарастания); высокая мутность воды в реках и водоемах-отстойниках. По многолетним архивам снимков обнаруживается быстрое увеличение площади разработки в течение нескольких лет. В свою очередь, отработанные участки отличаются признаками зарастания отвалов и объектов инфраструктуры (грунтовых дорог), уменьшением концентрации взвешенных частиц в речной воде и водоемах-отстойниках, что ведет к снижению ее яркости в красной зоне

спектра. При анализе многолетних архивов космических снимков не наблюдается увеличения площади разработок.

Оценка загрязнения воды взвешенными веществами. Важнейшим признаком загрязнения рек при золотодобыче является высокая мутность воды, обусловленная поступлением взвешенных веществ. По мере роста их концентрации яркость водной поверхности в видимых каналах спектра возрастает, что позволяет выявить такое загрязнение по спутниковым снимкам. Первые публикации о возможности изучения распространения взвесей по данным спутниковой съемки появились еще в 1970-х гг. (Ritchie et al., 1976; Лабутина, Сафьянов, 1980). Была обнаружена линейная зависимость между коэффициентами спектральной яркости (КСЯ) водной поверхности в види-

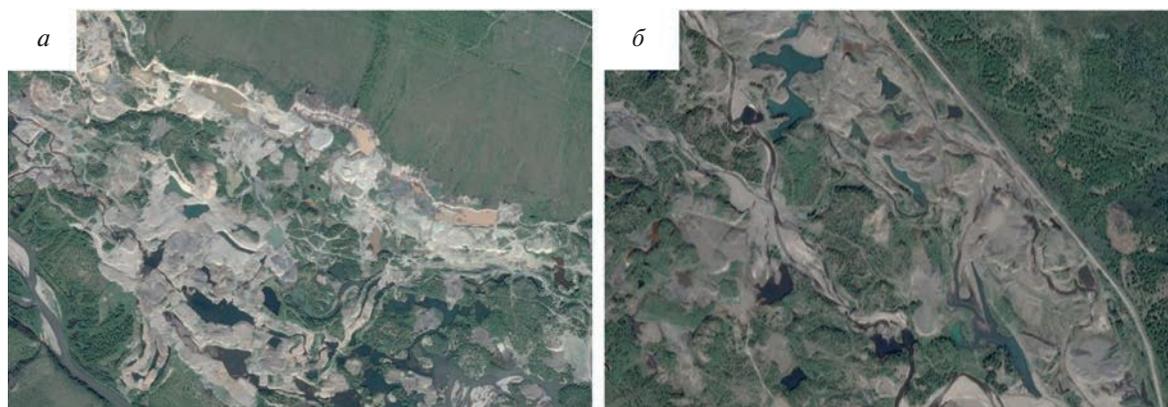


Рис. 2. Фрагменты снимков сверхвысокого разрешения с открытого картографического сервиса ArcGIS Imagery на участки активной золотодобычи (а) и отработанные участки (б).

мом диапазоне и концентрацией взвешенных веществ (Total Suspended Matter, TSM).

Количественные оценки мутности воды и TSM по спутниковым данным основаны на методах различной сложности. В ряде работ предложены простые регрессионные модели, позволяющие рассчитать значение TSM на основе КСЯ водной поверхности по спутниковым снимкам (Лабутина, Тарасов, 2018; Ле Хунг Чинь и др., 2020; Tripathi et al., 2020). Их общим недостатком является необходимость калибровки для каждого конкретного водотока. Также применяются физически-обоснованные модели (Nechad et al., 2010) или нейронные сети (Chen et al., 2015). Алгоритмы спутниковой оценки TSM могут существенно различаться для морских акваторий, озер и рек (Liu et al., 2019).

В настоящей работе для расчета TSM использован модуль The Case 2 Regional Coast Color Processor (C2RCC Processor, Brockmann et al., 2016), разработанный для программного пакета ESA SNAP версии 8.0. Алгоритм расчета TSM и других характеристик водной поверхности основан на моделировании переноса излучения. Расчеты выполняются набором нейронных сетей, которые позволяют восстановить количественные характеристики состояния поверхностных вод на основе коэффициентов спектральной яркости водной поверхности, полученных после атмосферной коррекции, и восстановленных коэффициентов поглощения и рассеяния излучения. Процедура атмосферной коррекции методом Sen2Cor также включена в функциональность модуля, т.е. на вход для расчетов подаются данные сенсора MSI уровня обработки L1B. Опыт применения модуля C2RCC Processor для оценки мутности и TSM в пресных водах представлен в работах (Neves et al., 2021; Nazirova et al., 2021) и в ряде других.

При расчете TSM в модуле C2RCC Processor необходимо задать значения ряда параметров.

Большинство из них были приняты по умолчанию, за исключением солености (задана равной 0.01 ppt), высоты местности (400 м над уровнем моря, что близко к урезу Колымского вдхр.), атмосферного давления, приведенного к уровню моря (1010 гПа) и температуры воды (задано значение 5°C). Расчет выполнен с помощью набора нейронных сетей C2RCC-nets. В результате получены значения TSM, а также степень его неопределенности для каждого пиксела водной поверхности с пространственным разрешением 20 м.

Расчеты выполнены по 27 сценам Sentinel-2, которые относятся к двум ячейкам глобальной сетки (T55VEK и T55VEJ) и покрывают исследуемый участок от г. Сусуман до Колымского вдхр. Получены снимки за весь период действия съемочной системы Sentinel-2 (с 2016 по 2021 гг.). Самой ранней датой съемки стало 18 июня, а самой поздней – 12 сентября. Из-за относительно благоприятных условий по облачности, наблюдавшихся в 2021 г., 12 из 27 проанализированных сцен приходится на этот год.

Для оценки изменчивости мутности воды во времени были выделены 10 тестовых полигонов в пределах русел рек Берелех, Аян-Юрях, Колыма, а также на Колымском вдхр. Эти участки расположены выше и ниже по течению от источников загрязнения, или от мест впадения загрязненных притоков, а их площадь составляет от 18 до 473 тыс. м². В пределах этих участков были рассчитаны средние значения TSM по снимкам.

Для оценки изменения мутности вниз по течению от основного источника загрязнения также был построен “профиль” вдоль рек Берелех, Аян-Юрях и Колыма, от г. Сусуман до Колымского вдхр. Профиль состоит из 22-х точек с шагом 10 км, для каждой из которых также были извлечены значения TSM. Аналогичный подход ранее применялся для визуализации распространения

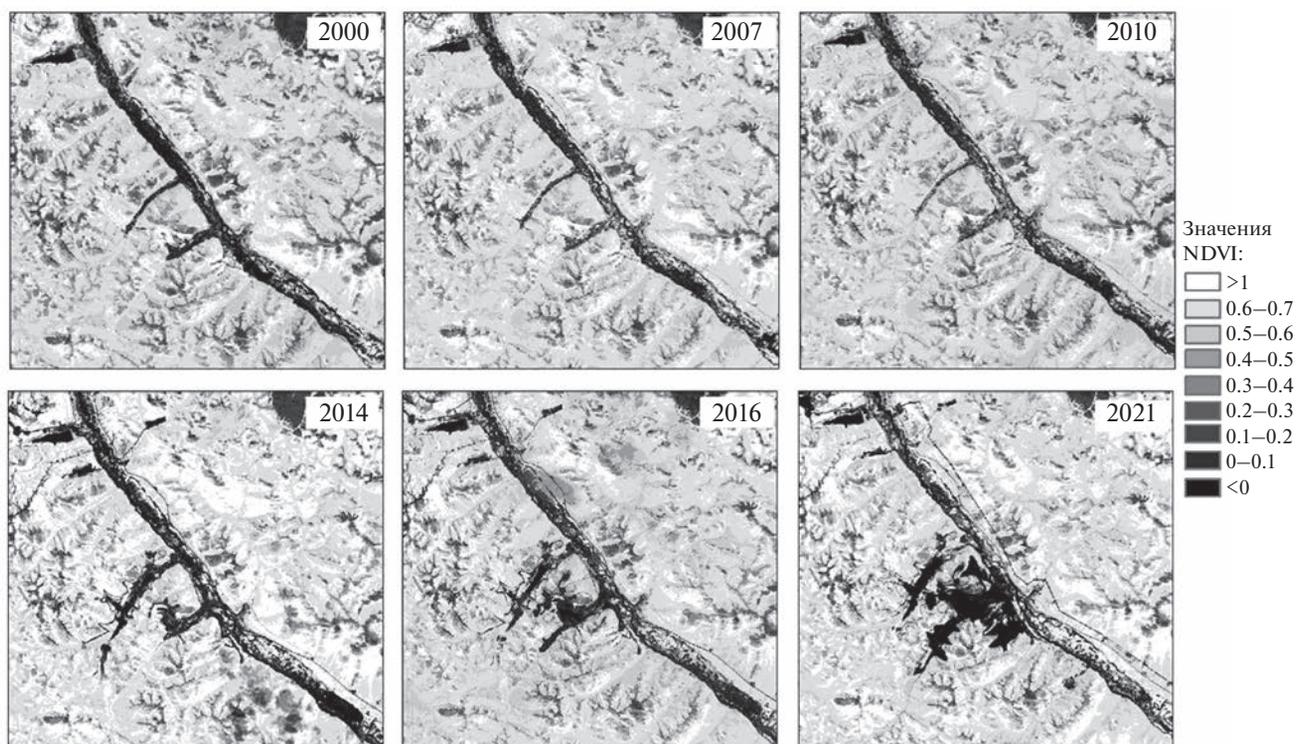


Рис. 3. Динамика NDVI на участках освоения Наталкинского золоторудного месторождения по спутниковым снимкам Landsat за период 2000 – 2021 гг.

загрязнения от изливов кислых шахтных вод (Рянков et al., 2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ динамики площади нарушенных земель. Анализ динамики значений NDVI в течение 2000–2021 гг. позволил определить период, когда началась активная золотодобыча в пределах исследуемого ключевого района. Так, на Наталкинском золоторудном месторождении в Тенькинском районе в период с 2000 по 2010 гг. не наблюдалось увеличения площади разработок (рис. 3). Следует отметить, что разность в значениях NDVI между 2001 и 2009 гг. близка к нулю для большей части исследуемой территории. Это свидетельствует о том, что в данный период в рассматриваемом регионе не проводилось расширение участков золотодобычи. С 2014 г. появляются первые признаки увеличения площади золотодобычи, а с 2016 по 2021 гг. – значительный рост темпов разработки. В период с 2010 г. по 2021 г. площадь, нарушенных при золотодобыче, увеличилась с 35 до 74 км². Такая картина характерна для многих районов золотодобычи в пределах выбранного ключевого участка Магаданской области и соответствует опубликованным данным о

динамике объемов добычи россыпного золота (Добыча, 2022).

На рис. 4 приведены фрагменты космических снимков Landsat-7 за 22.09.2001 и Landsat-8 за 12.09.2021 на территорию россыпного месторождения золота к востоку от закрытого поселка Нексикан. Фрагмент выделенной маски нарушенных при золотодобыче земель за период с 2001 по 2021 гг., приведен на рис. 4, в. На основе такой маски и были рассчитаны площади нарушенных земель, а также определены их основные границы.

На территории Тенькинского района площадь нарушенных земель в период с 2001 по 2021 год увеличилась с 70 до 507 км², в то же время в целом по территории трех районов получить такую оценку не удалось из-за отсутствия полного покрытия безоблачными снимками за 2001 г. По итогам анализа значений NDVI составлена картографическая база данных нарушенных земель для выбранных ключевых участков (рис. 5). Общая площадь нарушенных земель составила 2278 км² (2% от общей площади Сусуманского, Ягоднинского и Тенькинского районов), из которых на 221.8 км² (почти 10% от площади нарушенных земель) наблюдаются процессы восстановления растительности.

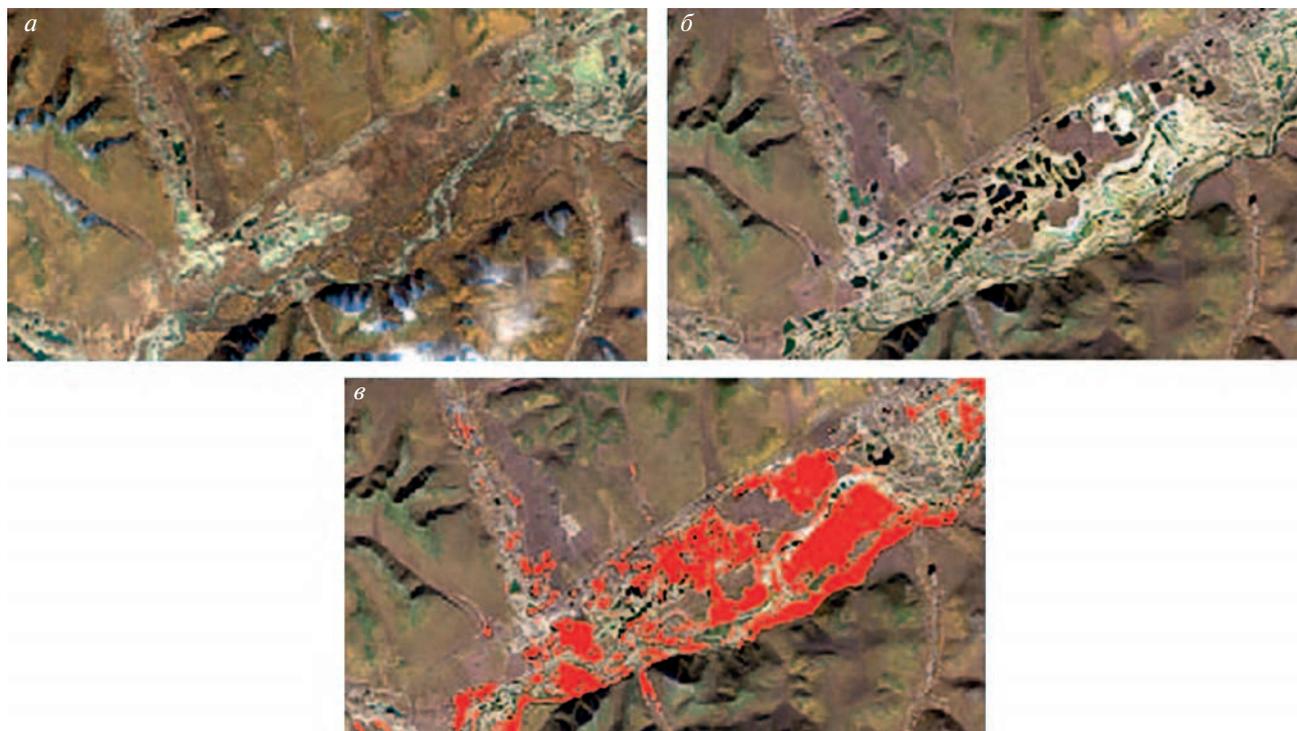


Рис. 4. Фрагменты снимков Landsat за разные годы: *а*) за 2001 год; *б*) за 2021 год; *в*) область нарушения земель при россыпной добыче золота, выделенная на основе разности NDVI, показана красным.

Анализ мутности воды и ее изменчивости со временем

По снимкам Sentinel-2 за 2016–2021 гг. установлено, что основным источником загрязнения рек Сусуманского и Тенькинского районов в настоящее время являются разрабатываемые россыпные месторождения золота в пойме р. Берелёх. Также разработки ведутся в пойме р. Омчак, но ширина водотока здесь недостаточна для того, чтобы оценить мутность по снимкам с пространственным разрешением 20 м, поэтому мутность воды р. Омчак не анализировалась. Крупнейший источник загрязнения находится в 10–15 км выше впадения р. Берелёх в р. Аян-Юрях. При слиянии этих рек отмечается значительное различие в мутности воды (рис. 6). Далее вода с высокой мутностью распространяется вниз по течению рек Аян-Юрях и Колыма вплоть до Колымского водохранилища, т.е. более чем на 200 км.

В 2021 г. было получено 5 безоблачных снимков на данную территорию за период с конца июня по сентябрь. Рассчитанное по этим снимкам значение TSM в воде р. Аян-Юрях ниже впадения загрязненной р. Берелёх в 2–10 раз превышало аналогичное значение, оцененное выше по течению от впадения этого притока. Максимальное значение TSM (115.4 г/м³) отмечалось 29 июня 2021 г. Однако ранее, в 2017–2019 гг., мутность воды р. Аян-Юрях выше и ниже по течению от устья

р. Берелёх была сопоставимой (рис. 7, *а*). Это указывает на повышение значимости р. Берелёх как источника загрязнения именно в последние два года.

При слиянии р. Аян-Юрях и Кулу (дающих начало р. Колыма) также обнаруживается резкое повышение TSM (от 1.7 до 16 раз, в зависимости от даты съемки). Причем эта закономерность не менялась на протяжении последних шести лет (с 2016 г.). В пойме р. Кулу разработка россыпных месторождений не ведется, поэтому мутность воды может рассматриваться как фоновая (рис. 7, *б*).

Как следует из рис. 7, значения TSM в загрязненных реках испытывают сильные внутригодовые и межгодовые колебания. Если межгодовая изменчивость может быть связана с увеличением площади разработок в пойме р. Берелёх, то внутригодовая изменчивость, вероятно, обусловлена режимом стока, т.е. мутность растет с увеличением расходов воды. Так, при сравнении расчетных значений TSM с данными об уровнях воды на гидропосту р. Колыма – с. Оротук (положение которого показано на рис. 1) отмечается максимум TSM в период спада весеннего половодья (29.06.2021). Минимумы приходятся на маловодные периоды в июле, августе и сентябре, а 31 августа отмечается существенный рост мутности, совпадающий с кратковременным подъемом уровня воды в реке из-за дождей (рис. 8, *а*). При этом рас-

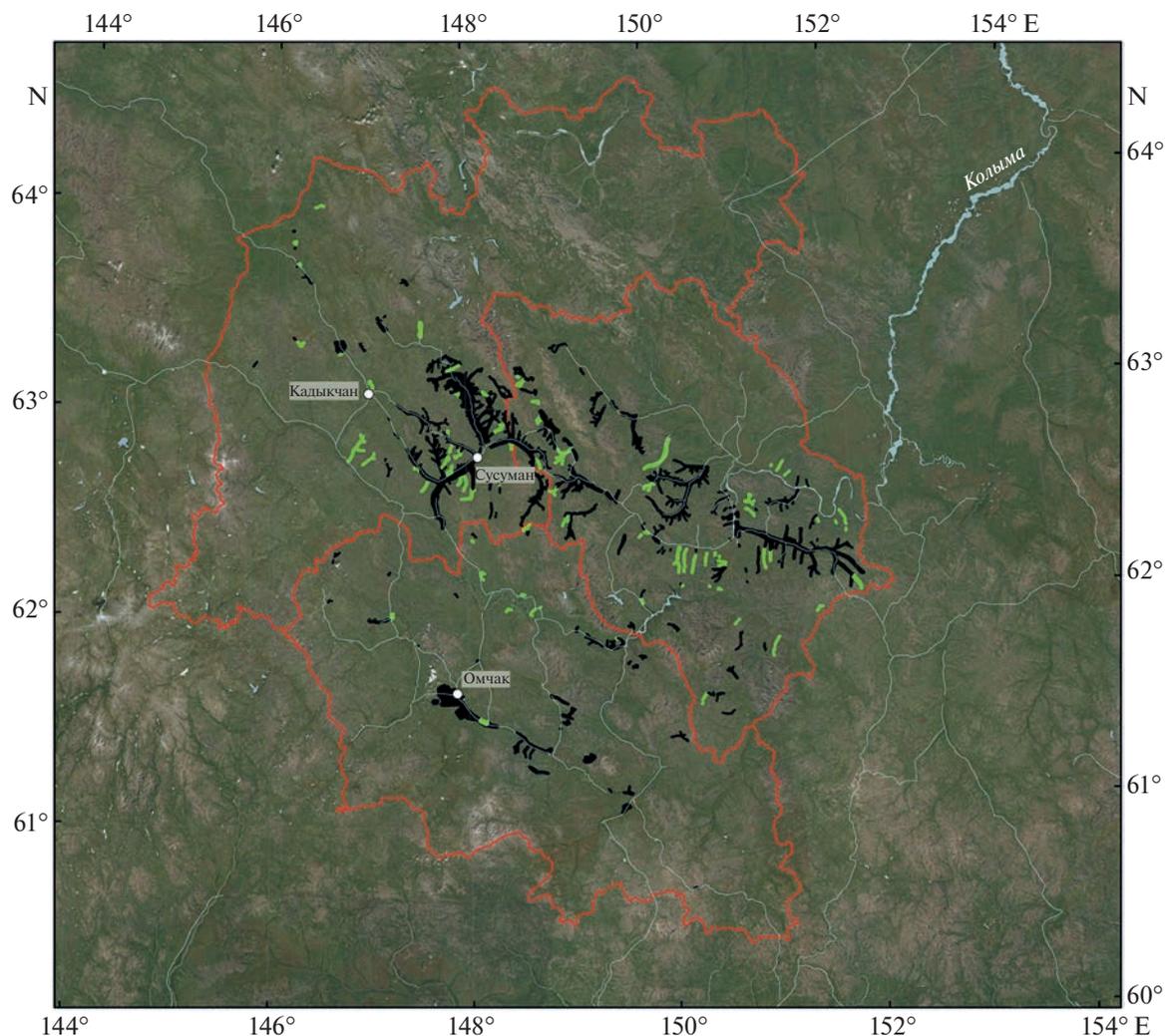


Рис. 5. Положение участков нарушенных земель. Черным показаны отвалы, где процессы восстановления растительности не наблюдаются; зеленым — отвалы с явными признаками восстановления растительности.

тут также и фоновые значения мутности (выше впадения загрязненных притоков).

Изменения мутности воды от г. Сусуман до Колымского вдхр., оцененные по снимкам Sentinel-2 за 2021 г., имеют в основном согласованный характер (рис. 8, б). Минимальные значения TSM во всех случаях отмечались вблизи г. Сусуман, т.е. выше по течению от источников загрязнения, а максимальные — ниже по течению от него, т.е. вблизи слияния рек Аян-Юрях и Берелех. Этот максимум наиболее хорошо выражен в случае 29.06.2021 г., когда наблюдались самые высокие значения TSM. Далее мутность снижается в связи с разбавлением воды ниже слияния рек Кулу и Аян-Юрях. В случае 12.09.2021 г. распределение мутности было иным — максимум ниже источников загрязнения почти не выражен, а самое высокое расчетное значение TSM (28 г/м^3) отмечалось

уже вблизи Колымского вдхр, т.е. на удалении более 100 км от источников загрязнения, что указывает на их незначительный вклад в общую мутность воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом проведенного исследования является оценка современной площади нарушенных земель в трех районах Магаданской области — Сусуманском, Ягоднинском и Тенькинском. На основе экспертного дешифрирования и анализа значений NDVI установлено, что около 2% площади района исследования нарушены в результате золотодобычи, из них только для 10% наблюдаются процессы восстановления растительности. На территории Тенькинского района выявлено увеличение площади нарушенных

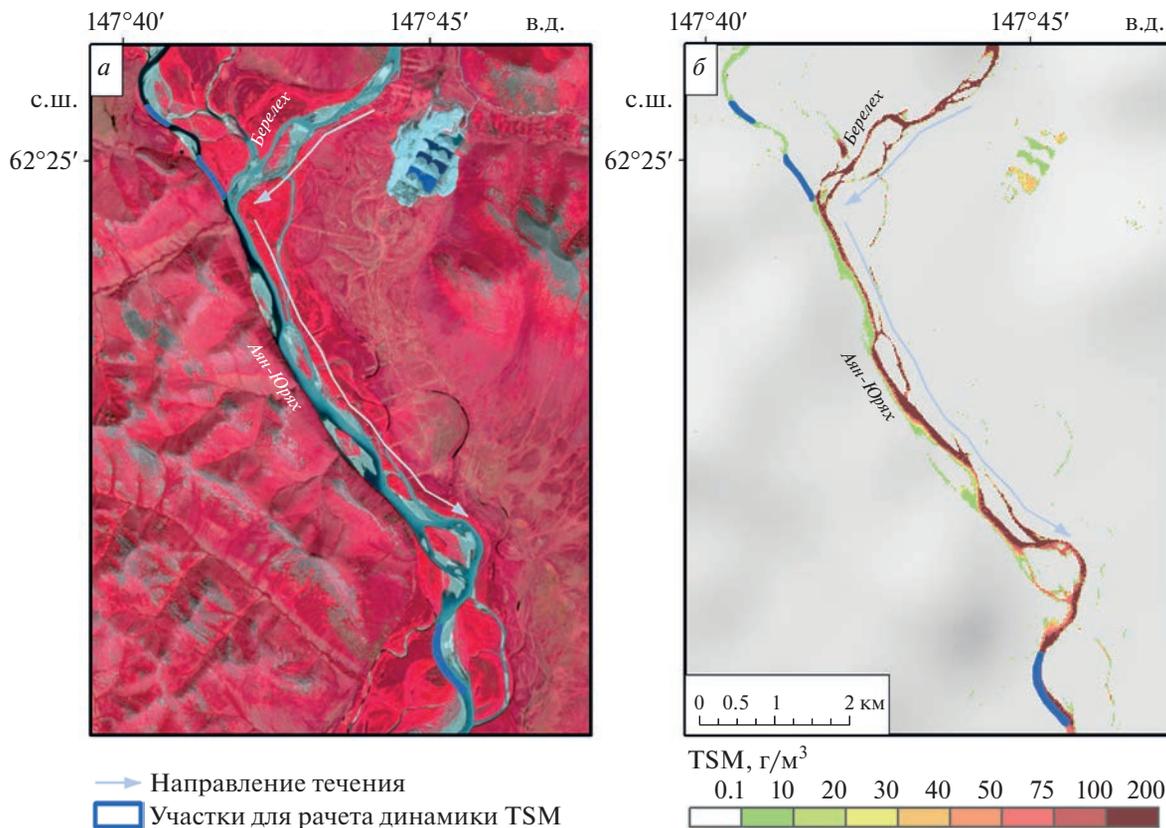


Рис. 6. Фрагмент снимка Sentinel-2 за 19.07.2021 г. в комбинации каналов NIR-Red-Green на участок у слияния рек Аян-Юрях и Берелёх (а), и расчетные значения TSM в воде (б).

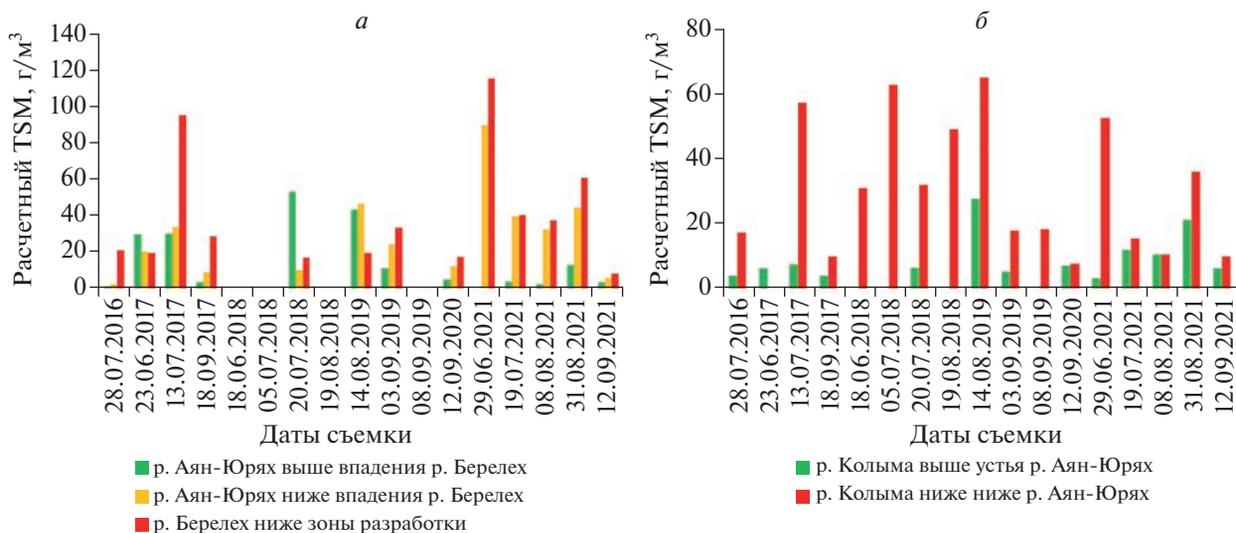


Рис. 7. Расчетные значения TSM по снимкам Sentinel-2 на тестовых участках вблизи слияния рек Аян-Юрях и р. Берелёх (а), р. Аян-Юрях и р. Кулу (б).

земель более чем в 7 раз за период 2001–2021 гг., что обусловлено увеличением площади разработок.

Также в результате исследования мутности воды по снимкам Sentinel-2 с применением модуля C2RCC Processor установлено, что основным ис-

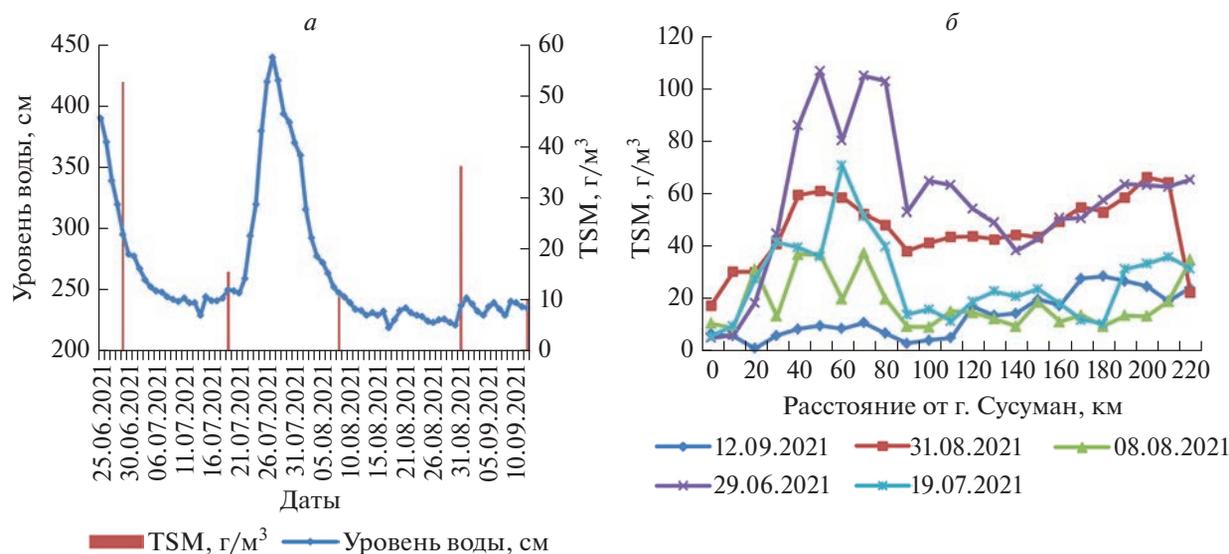


Рис. 8. Динамика расчетных значений TSM по снимкам Sentinel-2 и уровня воды по данным гидропоста р. Колыма – с. Оротук (а), и изменения расчетных TSM вниз по течению рек от г. Сусуман до Колымского вдхр. (б). Данные за летний период 2021 г.

точником загрязнения рек взвешенными веществами на территории Сусуманского и Тенькинского районов в настоящее время являются разрабатываемые россыпные месторождения золота в пойме р. Берелёх. Повышенные относительно фона концентрации взвешенных веществ в воде сохраняются вплоть до Колымского вдхр., т.е. почти на 200 км от источника загрязнения. Расчетные значения TSM в воде ниже источника загрязнения повышаются в 2–16 раз, при этом сезонная изменчивость определяется гидрологическими условиями (мутность уменьшается в период межени и растет при высоких уровнях воды). Дальнейшие исследования в данном направлении предполагают проведение полевой верификации полученных оценок TSM, а также выявление значимых источников загрязнения вод в других районах Магаданской области.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при поддержке Проекта СПБГУ № 75295776 “Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата” и проекта РФФИ 19-55-80028 “Оценка и прогноз влияния изменений климата на гидрологический режим рек горных плато Азии”. Оценка мутности водных объектов также выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (“ПРИОРИТЕТ-2030”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беликович А.В.* Растительный покров Сусуманского района Магаданской области // Комаровские чтения. Владивосток: Дальнаука. 2001. Вып. 48. С. 125–154.
 Добыча золота в Магаданской области.
 URL: <https://zolotodb.ru/article/11259> (дата обращения 01.09.2022).
Иванов В.В. Геоэкологические особенности освоения месторождений полезных ископаемых Якутии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 8-1. С. 59–62.
Корниенко С.Г. Характеристика антропогенных трансформаций ландшафтов в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 106–129.
Краснощечков К.В., Дергунов А.В., Пономарева Т.В. Геопространственный анализ техногенно-нарушенных экосистем Средней Сибири по спутниковым данным в ИК-диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 203–216.
Лабутина И.А., Сафьянов Г.А. Исследования распространения твердого стока рек по аэрокосмическим снимкам на примере Кодора и Селенги // Космическая съемка и тематическое картографирование. М. Изд-во Моск. ун-та, 1980. С. 118–125.
Ле Хунг Чинь, Заблоцкий В.Р., Тхи Тху Нга Нгуен. Разработка методики определения концентрации взвеси в поверхностных водах р. Дай (Вьетнам) по изображениям MSI Sentinel-2 с высоким пространственным разрешением // Исслед. Земли из Космоса. 2020. № 2. С. 15–23.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420020037>
Радомская В.И., Радомский С.М. Анализ влияния предприятий золотодобычи на состояние водных ресурсов //

- Изв. Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 1(3). С. 920–923.
- Страницы истории. 80 лет Сусуманскому ГОКу. 65 лет Сусуманскому району. Магадан: Охотник, 2018. 280 с.
- Чупаченко О.Н. Учебно-методическое пособие по проведению общественного мониторинга загрязнений рек при добыче россыпного золота с использованием космоснимков. М., Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2020. 36 с.
- Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Stelzer K., Embacher S., Ruescas A. Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. European Space Agency, (Special Publication). 2016. V. 740. P. 54.
- Chen J., Quan W., Cui T., Song Q. Estimation of total suspended matter concentration from MODIS data using a neural network model in the China eastern coastal zone // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2015. V. 155. P. 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.01.018>
- Ding Y., Zheng X., Zhao K., Xin X., Liu H. Quantifying the Impact of NDVIsoil Determination Methods and NDVI-soil Variability on the Estimation of Fractional Vegetation Cover in Northeast China // Remote Sensing. 2016. V. 8. Art. № 29. <https://doi.org/10.3390/rs8010029>
- Gallo Corredor J.A., Lizeth Vargas González G., Velasco Granados M., Gutiérrez L., Pérez E.H. Use of the gray water footprint as an indicator of contamination caused by artisanal mining in Colombia // Resources Policy. 2021. V. 73. Art. № 102197. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102197>
- Jarsjö J., Chalov S.R., Pietroni J. et al. Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia // Regional Environmental Change. 2017. V. 17. P. 1991–2005. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1169-6>
- Liu W., Wang S., Yang R., Ma Y., Shen M., You Y., Hai K., Baqa M.F. Remote sensing retrieval of turbidity in alpine rivers based on high spatial resolution satellites // Remote Sensing. 2019. V. 11(24). Art. № 3010. <https://doi.org/10.3390/rs11243010>
- Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Storchkov A. Comparison of in situ and remote-sensing methods to determine turbidity and concentration of suspended matter in the estuary zone of the Mzymta River, Black Sea // Remote Sensing. 2021. V. 13(1). P. 1–29. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>
- Nechad B., Ruddick K., Park Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. P. 854–866. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>
- Neves V.H., Pace G., Delegido J., Antunes S.C. Chlorophyll and suspended solids estimation in Portuguese reservoirs (Aguieira and Alqueva) from Sentinel-2 imagery // Water. 2021. V. 13(18). Art. № 2479. <https://doi.org/10.3390/w13182479>
- Pyanov S.V., Maximovich N.G., Khayrulina E.A., Berezina O.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K. Monitoring Acid Mine Drainage's Effects on Surface Water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images // Mine Water and the Environment. 2021. V. 40(3). P. 606–621. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00761-7>
- Ritchie J.C., Schiebe F.R., McHenry J.R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters // J. American Society of Photogrammetry, 1976. V. 42. P. 1539–1545.
- Schueler V., Kuemmerle T., Schröder H. Impacts of surface gold mining on land use systems in Western Ghana // Ambio. 2011. V. 40(5). P. 528–539. <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0141-9>
- Tripathi G., Pandey A.C., Parida B.R. Spatio-temporal analysis of turbidity in Ganga River in Patna, Bihar using Sentinel-2 satellite data linked with COVID-19 pandemic. IEEE India Geoscience and Remote Sensing Symposium, InGARSS 2020 – Proceedings. 2020. P. 29–32. <https://doi.org/10.1109/InGARSS48198.2020.9358965>

Satellite-Based Mapping of the Negative Impact of Gold Mining Enterprises on the Natural Environment of the Cryolithozone (On the Example of the Magadan Region)

P. G. Ilyushina^{1, 3}, A. N. Shikhov^{2, 3, 4}, and O. M. Makarieva³

¹M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

²Perm State University, Perm, Russia

³Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

⁴Kazan Federal University, Kazan, Russia

Gold mining at ore and alluvial deposits causes a substantial negative impact on the natural environment, in particular land degradation and contamination of watercourses with suspended solids. In this study, we consider a methodology for identifying and mapping the negative impact of gold mining enterprises on the natural environment based on a long-term series of free-available Landsat and Sentinel-2 satellite images. The study was carried out on the example of Tenkinsky, Susumansky and Yagodninsky districts of the Magadan region, where the largest gold deposits are located. Identification features of active mining areas, as well as abandoned ones (on which vegetation began to recover), have been found on satellite images. Based on expert interpretation of the images and NDVI analysis, it was found that about 2% of the study area was affected by gold mining. The processes of vegetation recovery were identified only on 10% of the degraded lands. In the Tenkinsky district, the area of disturbed lands for the period 2001–2021 increased by more than 7 times,

which is associated with a substantial increase in gold mining. Using the C2RCC processor (module of the SNAP software package), the content of suspended solids in the water of the most impacted rivers Berelekh, Ayan-Yuryakh and Kolyma, was estimated in comparison with natural values (typical for non-contaminated water). We found that the main source of suspended matter in the rivers is the alluvial gold deposits located in the floodplain of the Berelekh river. At the same time, the seasonal variability of water contamination is determined by hydrological situation. In particular, water turbidity decreases during low water periods and increases during high-flow periods.

Keywords: gold mining, land disturbance, water contamination, suspended solids, Landsat, Sentinel-2, NDVI, Magadan Region

REFERENCES

- Belikovich A.V.* Rastitel'nyy pokrov Susumanskogo rayona Magadanskoj oblasti [Vegetation cover of the Susuman district of the Magadan region] // Komarovskiy chteniye. Vladivostok: Dalnauka, 2001. V. 48. P. 125–154. (In Russian).
- Gold mining in the Magadan region. URL: <https://zolo-todb.ru/article/11259> Accessed 01.09.2022. (In Russian).
- Ivanov V.V.* Geoekologicheskiye osobennosti osvoyeniya mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh Yakutii. [Geoeological features of the development of mineral deposits in Yakutia] // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2013. V. 8(1). P. 59–62. (In Russian).
- Kornienko S.G.* Kharakteristika antropogennykh transformatsiy landshaftov v rayone Bovanenkovskogo mestorozhdeniya po dannym sputnikov Landsat [Characterization of anthropogenic landscape transformations in the area of the Bovanenkovskoye field according to Landsat satellite data] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19(2). P. 106–129. (In Russian).
- Krasnoshchekov K.V., Dergunov A.V., Ponomareva T.V.* Geoprostranstvennyy analiz tekhnogenno-narushennykh ekosistem Sredney Sibiri po sputnikovym dannym v IK-diapazone [Geospatial analysis of technogenically disturbed ecosystems of Central Siberia according to satellite data in the infrared bands] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2022. V. 19(3). P. 203–216. (In Russian).
- Labutina I.A., Safyanov G.A.* Issledovaniya rasprostraneniya tverdogo stoka rek po aerokosmicheskim snimkam na primere Kodora i Selengi [Studies of the distribution of solid runoff of rivers from aerospace images on the example of Kodora and Selenga] // osmicheskaya s'yemka i tematicheskoye kartografirovaniye. Moscow, Publishing House of Moscow State University. 1980. P. 118–125. (In Russian).
- Le Hung Chinh, Zablotsky V.R., Thi Thu Nga Nguyen.* Razrabotka metodiki opredeleniya kontsentratsii vzvesi v povorkhnostnykh vodakh r. Day (V'yetnam) po izobrazheniyam MSI Sentinel-2 s vysokim prostranstvennym razresheniym [Development of a methodology for determining the concentration of suspended matter in the surface waters of the Dai river (Vietnam) from MSI Sentinel-2 High Spatial Resolution Imagery] // Issledovaniye Zemli iz Kosmosa. 2020. V. 2. P. 15–23. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0205961420020037>.
- Radomskaya V.I., Radomsky S.M.* Analiz vliyaniya predpriyatiy zolotodobychi na sostoyaniye vodnykh resursov [Analysis of the influence of gold mining enterprises on the state of water resources] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. 2014. V. 16(3). P. 920–923. (In Russian). *History pages.* 80 years of Susuman GOK. 65 years of Susumansky district. Magadan: Okhotnik, 2018. 280 p. (In Russian).
- Chupachenko O.N.* Uchebno-metodicheskoye posobiye po provedeniyu obshchestvennogo monitoringa zagryazneniy rek pri dobyche rossypnogo zolota s ispol'zovaniyem kosmosnimkov [Educational and methodological manual for public monitoring of river pollution during the extraction of alluvial gold using satellite images]. Moscow World Wildlife Fund (WWF), 2020. 36 p. (in Russian).
- Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Stelzer K., Embacher S., Ruescas A.* Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. European Space Agency (Special Publication). 2016. V. 740. P. 54.
- Chen J., Quan W., Cui T., Song Q.* Estimation of total suspended matter concentration from MODIS data using a neural network model in the China eastern coastal zone // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2015. V. 155. P. 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.01.018>.
- Ding Y., Zheng X., Zhao K., Xin X., Liu H.* Quantifying the Impact of NDVIsoil Determination Methods and NDVIsoil Variability on the Estimation of Fractional Vegetation Cover in Northeast China // Remote Sensing. 2016. V. 8. Art. No. 29. <https://doi.org/10.3390/rs8010029>.
- Gallo Corredor J.A., Lizeth Vargas González G., Velasco Granados M., Gutiérrez L., Pérez E.H.* Use of the gray water footprint as an indicator of contamination caused by artisanal mining in Colombia // Resources Policy. 2021. V. 73. Art. No. 102197. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102197>
- Jarsjö J., Chalov S.R., Pietroni J. et al.* Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia // Regional Environmental Change. 2017. V. 17. P. 1991–2005. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1169-6>.
- Liu W., Wang S., Yang R., Ma Y., Shen M., You Y., Hai K., Baqa M.F.* Remote sensing retrieval of turbidity in alpine rivers based on high spatial resolution satellites // Remote Sensing. 2019. V. 11(24). Art. No. 3010. <https://doi.org/10.3390/rs11243010>
- Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Stochkov A.* Comparison of in situ and remote-sensing methods to determine turbidity and concentration of suspended matter in the estuary zone of the Mzymta River, Black Sea // Remote Sensing. 2021. V. 13(1). P. 1–29. <https://doi.org/doi:10.3390/rs13010143>

- Nechad B., Ruddick K., Park Y.* Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. P. 854–866.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>
- Neves V.H., Pace G., Delegido J., Antunes S.C.* Chlorophyll and suspended solids estimation in Portuguese reservoirs (Aguieira and Alqueva) from Sentinel-2 imagery // *Water*. 2021. V. 13(18). Art. No. 2479.
<https://doi.org/10.3390/w13182479>
- Pyankov S.V., Maximovich N.G., Khayrulina E.A., Berezina O.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K.* Monitoring Acid Mine Drainage's Effects on Surface Water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images // *Mine Water and the Environment*. 2021. V. 40(3). P. 606–621.
<https://doi.org/10.1007/s10230-021-00761-7>
- Ritchie J.C., Schiebe F.R., McHenry J.R.* Remote sensing of suspended sediments in surface waters // *J. American Society of Photogrammetry*, 1976. V. 42. P. 1539–1545.
- Schueler V., Kuemmerle T., Schröder H.* Impacts of surface gold mining on land use systems in Western Ghana // *Ambio*. 2011. V. 40(5). P. 528–539.
<https://doi.org/10.1007/s13280-011-0141-9>
- Tripathi G., Pandey A.C., Parida B.R.* Spatio-temporal analysis of turbidity in Ganga river in Patna, Bihar using Sentinel-2 satellite data linked with COVID-19 pandemic. *IEEE India Geoscience and Remote Sensing Symposium, InGARSS 2020 – Proceedings*. 2020. P. 29–32.
<https://doi.org/10.1109/InGARSS48198.2020.9358965>