

К вопросу оценки объемов дражных отвалов россыпной золотодобычи и изучения их поверхности с использованием данных дистанционного зондирования Земли

Р.А. Секриеру¹, Ю.А. Озарян^{2*}

¹Вычислительный центр ДВО РАН – обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН, Хабаровск, Россия

²Институт горного дела ДВО РАН – обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН, Хабаровск, Россия

В статье рассматривается методика расчёта объёма дражных отвалов, образованных в результате разработки месторождений россыпного золота юга Дальнего Востока, с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Рассмотрено применение цифровых моделей рельефа SRTM, ASTER, ALOS, Copernicus, FABDEM и GEDTM. Для повышения точности расчётов в условиях значительной протяжённости и неоднородности рельефа, использовался модифицированный алгоритм построения диаграммы Вороного для сегментации территорий с дражными отвалами. Проведён сравнительный анализ результатов расчёта объёма отвалов на двух участках – вблизи села Бриакан (Хабаровский край) и реки Джалинда (Амурская область), с учётом и без высоты растительного покрова. Выявлены ограничения применения различных цифровых моделей рельефа, и предложены пути повышения точности оценки объёма территорий с дражными отвалами, что имеет важное значение как для оценки экологического воздействия, так и для планирования потенциальной повторной переработки техногенных образований. Для оценки воздействия на почвенный покров и растительность произведен расчет вегетационных индексов. Установлены особенности процессов естественного восстановления растительности, с использованием в том числе и портала Vega-science для определения произрастающих типов леса. Определены границы территорий с дражными отвалами, и рассчитана карта здоровья растительности путём расчёта индекса EVI (Enhanced Vegetation Index).

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, месторождения россыпного золота, отвалы, цифровая модель рельефа, здоровье растительности

Для цитирования: Секриеру Р.А., Озарян Ю.А. (2026). К вопросу оценки объемов дражных отвалов россыпной золотодобычи и изучения их поверхности с использованием данных дистанционного зондирования Земли. *Георесурсы*, 28(2), с. 236–244. <https://doi.org/10.18599/grs.2026.2.17>

Введение

Одним из основных направлений недропользования в Дальневосточном федеральном округе является освоение месторождений россыпного золота. В Хабаровском крае 90% золота и вся платина добываются из россыпных месторождений. При освоении месторождений золота на Дальнем Востоке ежегодно нарушается свыше 15000 га земель, более 2/3 из которых приходится на долю россыпных месторождений. Общей характерной особенностью техногенных образований золотосодержащих россыпей Дальнего Востока является накопление в них драгоценного металла практически всех классов крупности и морфологических форм, в том числе и те, которые не учитываются недропользователями при геологоразведке.

Общая площадь обработанных территорий Кербинского золотоносного района Хабаровского края составляет не менее 3600 га. Наиболее продуктивными являются россыпи рр. Семи, Гонгрена, Керби и др. В центральной части района россыпи практически обработаны, а часть их переведена в категорию техногенных. Остались в основном россыпи с низкими содержаниями золота или погребенные. Всего в Кербинском районе добыто 52252 кг золота, разведанных запасов числится 2591 кг, а прогнозных 35100 кг. Содержание золота в россыпях колеблется от 86 до 962 мг/м³. Район характеризуется исключительно высокой плотностью россыпной золотоносности (Литвинцев и др., 2021).

В районе Соловьевского золотоносного узла Амурской области осуществляется добыча золота дражным и раздельным открытым способом со второй половины 19 в., в том числе на Уркано-Джалиндинском месторождении. В 1866 г. экспедицией Н.П. Аносова выявлены промышленные россыпные месторождения в долине реки Джалинда. В августе 1867 г. на реке был открыт первый в Амурской области прииск Васильевский, где расположен нынешний

* Ответственный автор: Юлия Александровна Озарян
e-mail: ozaryanigd@gmail.com

© 2026 Коллектив авторов

Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

поселок Стрелка. Россыпь эксплуатируется в настоящее время во многих частях силами Соловьевского прииска¹. Кроме того, артелью “Исток” проведена разведка в верхнем течении реки Джалинда на отработанной ранее площади драгой. Золотосодержащими являются коренные породы плотика, которые не могла разработать драга. Мощность остаточного золотоносного пласта 0,4–2,4 м, в среднем 1,5 м. Параметры россыпи: запасы С1 – 129 кг (длина 0,63 км, ширина 166 м, содержание на массу 248 мг/м³, содержание на пласт 8290 мг/м³). Этой же артелью разведана техногенная россыпь реки Джалинды у ручья Нечаянного с запасами С1 – 567 кг (длина 5,6 км, ширина 99 м, мощность массы 4,3 м, мощность песков 1,5 м, содержание на массу 239 мг/м³, содержание на пласт 687 мг/м³, проба 940). Прогнозные ресурсы пылевидного золота в техногенных россыпях Джалиндинского узла составляют около 60 тонн. Недостатки технологий добычи золота в начале XX века и, как следствие, высокое содержание металла в отходах горного производства стали причиной вовлечения в повторную переработку техногенного материала из отвалов, расположенных в долинах рек, в том числе Джалинда, Нагима, Б. Янкан, Б. Инагли. В начале 2000-х годов исследователи утверждали, что по мере совершенствования техники, технологий разработки и обогащения песков роль техногенных объектов будет возрастать (Озарян, 2019).

Добыча дражным способом является наиболее эффективным методом освоения месторождений россыпного золота на Дальнем Востоке. Данный метод добычи сопровождается формированием значительных объемов отвальных образований. Проблема дражных отвалов включает в себя экологический и экономический аспекты. С точки зрения воздействия на окружающую среду, дражные отвалы занимают значительные территории, существенно меняя ландшафт и оказывая воздействие на окружающую среду, включая деградацию почв и нарушение гидрологических систем. Изменение структуры ландшафта вследствие скопления отвальных пород может привести к нарушению режима водообмена, изменению кислотности и ухудшению её плодородия. Отвалы также влияют на гидрологические процессы, изменяя маршруты поверхностного стока и подземных вод, что может способствовать эрозии и образованию мест с пониженной водоёмкостью. Наряду с этим, изменение ландшафта негативно сказывается на биоразнообразии региона, вызывая миграцию видов биоты и ухудшение условий обитания представителей флоры и фауны. Однако при исчезновении одних видов из-за ухудшения условий обитаний, после некоторого периода восстановления фиксируется миграция других видов на места зарастающих отвальных массивов.

Работы дражным способом проводятся в поймах и долинах рек, в процессе которых производится смещение русел водотоков, их перегораживание плотинами и отвалами, в результате чего нарушается не только гидрогеологический режим, но и существенно изменяются ландшафтные особенности района. Появляются техногенные объекты, такие как гале-эфельные отвалы, плотины, дамбы, отвалы пустых пород и хвостов промывки.

В условиях сокращения интенсивности геологической разведки и повышения процента извлечения ценных компонентов актуальным стал вопрос повторной переработки дражных отвалов, которые содержат золото, не извлечённое при первоначальной, а часто и повторной добыче. Экономическая выгода от такого подхода заключается в возможности добычи дополнительных материалов без освоения новых участков. Однако для реализации такого потенциала необходимо провести оценку объёмов и качественных характеристик техногенного сырья. Таким образом, исследование параметров дражных отвалов и качества заключенного в них сырья становится важным шагом в оценке ресурсного потенциала. По данным авторов (Мирзеханов, Мирзеханова, 2013), в техногенные образования переходит от 10 до 50% содержащегося в первичной россыпи металла. При этом, повторная переработка дражных отвалов может создать возможность для совмещения производственного процесса с экологической реабилитацией нарушенных территорий.

Традиционные методы определения объёмов дражных отвалов основаны на наземных геодезических измерениях и сопряжены с существенными ограничениями. Участки добычи находятся на большом расстоянии друг от друга, имеют значительную протяженность и сложный рельеф, связанный с формой отвалов. Перечисленные ограничения определяют высокую стоимость и трудоёмкость полевых исследований. В связи с этим, использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и алгоритмов их обработки является перспективным подходом к решению задачи оценки объёмов техногенного сырья, размещенного в дражных отвалах и их влияния на качество окружающей среды. Современные технологии обеспечивают возможность получения информации с высокой точностью о различных характеристиках поверхности. Использование оптических данных со спутников Sentinel и Landsat может позволить определить границы территорий с дражными отвалами и оценить динамику показателей качества растительного покрова и его плотности за продолжительный временной период. Имеющиеся в открытом доступе цифровые модели рельефа позволяют оценить характеристики объёма исследуемых территорий, но имеют несколько ограничений, сказывающихся на точности оценки. Этот вопрос подробнее изучен авторами в настоящей статье.

Таким образом, цель исследования состоит в создании метода, позволяющего дистанционно определить объёмы дражных отвалов для оценки перспективы повторной переработки и состояния растительности на поверхности техногенных образований.

Исходные данные и методы

В качестве исходных данных используются спутниковые снимки с космических аппаратов Sentinel-2 и Landsat 5. Снимки Sentinel-2 имеют пространственное разрешение 10 метров в спектральных диапазонах, чаще всего используемых для расчета вегетационных индексов. Спутники Landsat имеют в этих же диапазонах разрешение 30 метров. Использование данных со спутников Landsat обусловлено продолжительным временным промежутком съёмки (с ~2000 г. по настоящее время). Период доступности спутниковых снимков Sentinel-2 ограничен 2017 годом, но высокое пространственное разрешение позволяет

¹ <https://goldmap.info/index.php/placer/195-dzhalinda>

точнее определять границы территорий с дражными отвалами и рассчитывать более детальную карту здоровья растительности по вегетационным индексам. Карта здоровья растительности за 2024 г. получена путём расчёта индекса EVI (Enhanced Vegetation Index).

Исследовались участки дражных отвалов вблизи села Бриакан (Хабаровский край) и реки Джалинда (Амурская область). На рисунке 1 представлены синтезированные RGB снимки этих участков, полученные по данным космического аппарата Sentinel-2.

При исследовании растительного покрова рассматривается пик вегетационного периода, который в этих районах соответствует середине июля. Для оценки объёма отходов, размещённых в дражных отвалах, использовались цифровые модели рельефа (Digital Elevation Model – DEM), которые представляют числовые значения высотных характеристик земной поверхности и подразделяются на цифровые модели местности (Digital Terrain Model – DTM) и цифровые модели поверхности (Digital Surface Model – DSM). DTM является моделью, отображающей непосредственно значения высоты «голой» почвы без учёта искусственных объектов и растительности. DSM включает в себя высоты всех объектов, расположенных на земной поверхности (здания, сооружения, растительность).

Распространёнными на сегодняшний день являются модели SRTM, ASTER (Tachikawa et al., 2011), ALOS (Takaku et al., 2014) и Copernicus (European Environment Agency, 2020; Yang et al., 2011; Tadono et al., 2014; Khasanov, 2020; Li et al., 2022). Данные SRTM собраны в 2000 году во время миссии шаттла Endeavour. Эта модель основана на радиолокационных измерениях, что обеспечивает хорошее качество данных. Данные ASTER собраны с 2000 по 2011 гг. и периодически обновляются. Для их формирования используется стереофотограмметрический метод на оптических снимках. Данные ALOS собраны в период с 2006 по 2011 год. Модель рельефа создана на основе L-диапазонного радара. Программа Copernicus

началась в 2011 году и, аналогично ASTER, модель периодически обновляется. Пространственное разрешение перечисленных моделей составляет примерно 30 метров.

Все указанные модели в той или иной степени являются DSM. В связи с тем, что модель SRTM основана на радиолокационных данных, исключается высота растительности, если она недостаточно густая или высокая. Использовались данные за 2000 год, когда некоторые участки с дражными отвалами ещё не существовали, что является ограничением для её применения при расчёте объёма.

Проблему определения растительности предлагается частично решить с помощью данных Global Forest Canopy Height – GFCH (Simard et al., 2011). GFCH представляет собой модель, описывающую высоту лесного покрова. Ограничением для её применения является разница в пространственном разрешении с моделями DEM и временная разница в данных. Данные GFCH доступны за 2000, 2019 и 2020 годы, при этом данные 2019 года не включают территории, расположенные выше 53 градусов северной долготы, где находятся рассматриваемые участки с дражными отвалами. Пространственное разрешение этих данных также может внести значимую ошибку, так как значения высоты лесного покрова будут усреднёнными для большого участка поверхности. При сравнении данных за 2000 и 2020 год максимальная разница в высоте деревьев на исследуемых участках составила ~5 метров (рис. 2). Это может говорить о том, что область уже к 2000 году была покрыта деревьями, высота которых мало изменилась с того времени.

В качестве первой альтернативы описанным моделям рассмотрено использование DTM, полученных с помощью методов машинного обучения и других алгоритмов. Рассматриваются две такие модели: FABDEM и GEDTM (Marsh et al., 2023; Ho et al., 2025). FABDEM – это DTM, созданная на основе Copernicus DSM, из которой удалены надземные объекты. Для удаления объектов использовались модели машинного обучения и карты покрытия

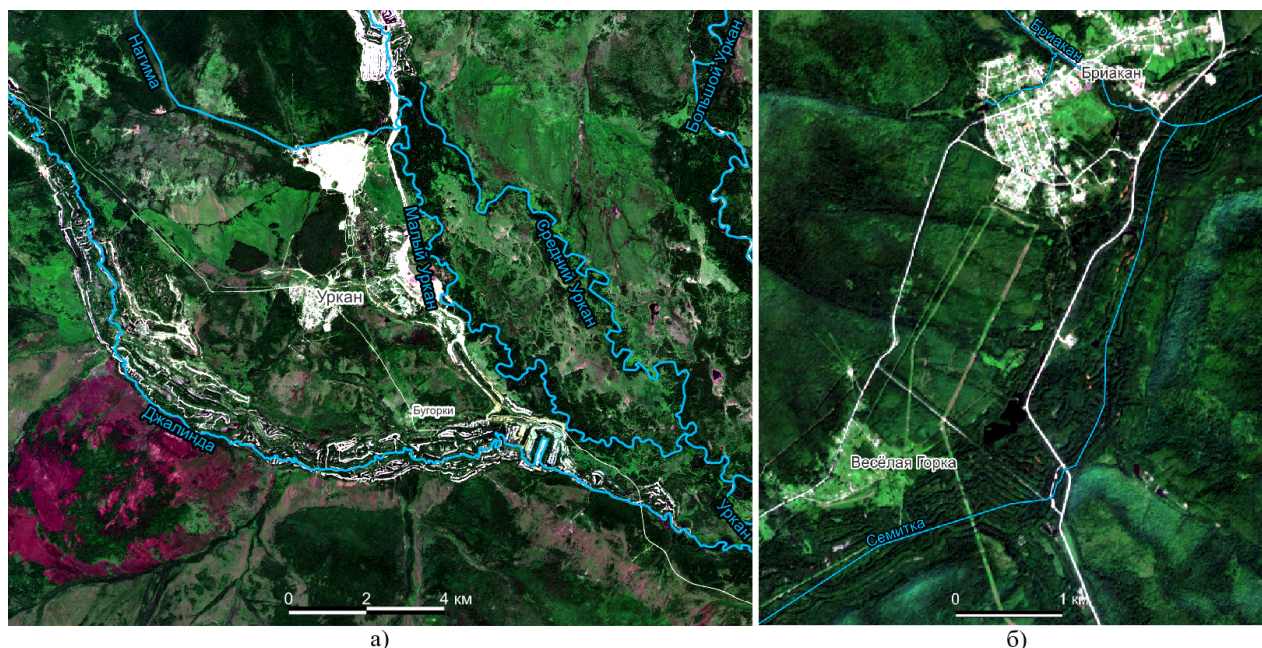


Рис. 1. а) Дражные отвалы р. Джалинда, б) Дражные отвалы р. Семитка

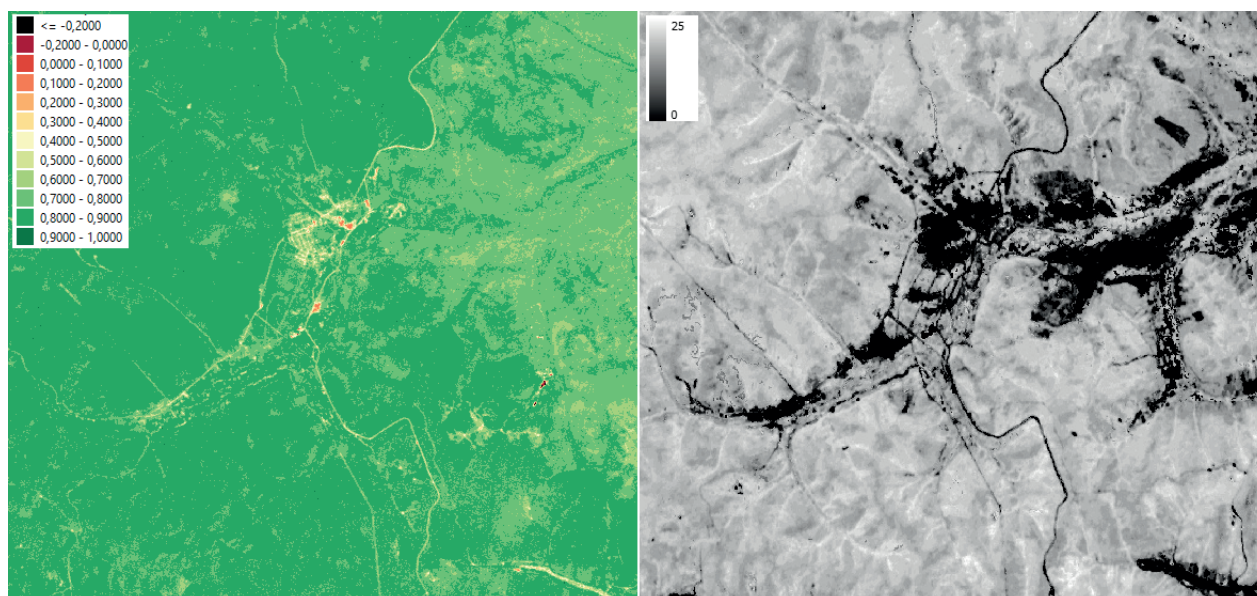


Рис. 2. Покрытие территории растительностью по данным Landsat 5 по значениям индекса NDVI (слева) и высота деревьев на том же участке в 2000 г. (справа)

поверхности. GEDTM – это DTM, разработанная на основе данных LiDAR-миссии (Global Ecosystem Dynamics Investigation). Данная модель создавалась с учётом GEDI и комбинировалась с другими DEM для улучшения данных о рельефе.

Второй альтернативой является использование данных Sentinel-1 для создания модели рельефа исследуемой территории. Пространственное разрешение полученной модели достигает 5 метров, но её создание требует больших временных затрат в сравнении с использованием готовых DEM.

При расчёте объёма карьеров или объектов размещения отходов может использоваться расчёт по базовой высоте выбранного участка. Например, используется глубина карьера и значения на границах, далее разница в высотах умножается на площадь, и получается значение объёма. Протяженность областей с дражными отвалами определяет то, что высота на разных участках может сильно меняться. Для снижения влияния амплитуды высоты на результат расчета, исследуемая область разделяется на сегменты с помощью модифицированного алгоритма создания полигонов Вороного.

Полигоны Вороного – это метод разбиения пространства на области, каждая из которых соответствует заданной точке (генераторной) так, что любая точка внутри области находится ближе к своей генераторной точке, чем к любой другой из них. Т.е. для множества точек $\{P_i\}$ каждая область $V(P_i)$ описывается как множество точек x , удовлетворяющих неравенству:

$$V(P_i) = \{x \in R^n : \|x - P_i\| \leq \|x - P_j\|, \forall j \neq i\},$$

где $\|\cdot\|$ обозначает евклидову норму. Диаграмма Вороного широко используется при расчете объёмов и распределения нагрузок на участках местности.

На рисунке 3 показаны этапы алгоритма разделения поверхности на полигоны. Для определения точек, через которые поверхность будет разделена на части, используется центральная линия поверхности. Так как

область отвалов может сужаться и расширяться на различных участках, она имеет множество ложных точек ветвления (рис. 3а). Они удаляются итеративно по заданной длине ветви, которая считается ложной (рис. 3б). В соответствии с полученными ветвями, исходный полигон делится на несколько частей. На каждой из частей вдоль её центральной линии расставляются точки на заранее заданном расстоянии друг от друга, на последнем этапе через эти точки проводятся прямые (рис. 3в). Таким образом, исходный полигон делится сначала на части исходя из точек ветвления, затем для каждой из частей строится диаграмма Вороного. На рисунке 3 (г, д, е) представлено сравнение результатов построения полигонов по исходному алгоритму без удаления ложных ветвей (г), с удалением ложных ветвей (д) и по модифицированному алгоритму (е).

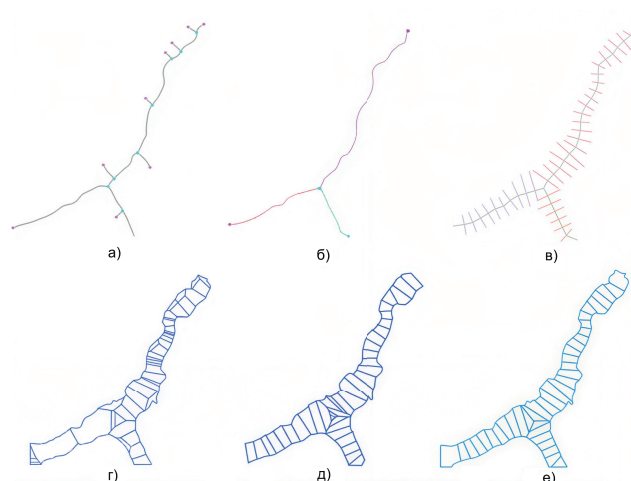


Рис. 3. Этапы алгоритма разбиения поверхности на полигоны и сравнение результатов: а – исходная центральная линия, б – удаление ложных ветвей, в – разбиение полигона по центральной линии с построением поперечных сечений, г – результат без удаления ложных ветвей, д – результат с удалением ложных ветвей, е – результат модифицированного алгоритма.

Недостатком алгоритма является то, что параметр длины ветви не для всех участков показывает, является ли ветвь действительно ложной. Поэтому, при увеличении размера территории, алгоритм работает хуже. Слишком большие территории, например, на реке Джалинда, лучше заранее разделить на части меньшего размера.

Результаты

Построение и анализ цифровых моделей рельефа

Алгоритм создания DEM по паре снимков Sentinel-1 представлен на рис. 4 слева, справа изображена полученная по паре снимков за ноябрь 2021 года карта высот. Когерентность пары снимков принимает значения от 0 до 0,4, чего недостаточно для получения качественной цифровой модели рельефа. Это обусловлено обилием растительности и значительными изменениями поверхности отвалов. Модель рельефа, полученная за другой временной период, предоставляет аналогичный или более плохой результат. Когерентность между снимками также остаётся в диапазоне 0–0,4. Для других участков, более свежих с дражными отвалами, сложно подобрать пару качественных снимков, либо они вовсе отсутствуют, что делает этот способ неподходящим для расчета объёма по данной карте рельефа.

В связи с этим, расчет проводится по картам рельефа ALOS, ASTER, Copernicus, FABDEM и GEDTM. Территория с дражными отвалами на снимках выглядит почти плоской, что может быть связано с неточностью цифровой модели рельефа и влиянием процессов, происходивших на протяжении долгого времени, в том числе ветровой и водной эрозий, меняющих поверхность отвалов, гравитационного перемещения грунтовых масс, аккумуляции наносов в понижении рельефа, зарастания поверхности отвалов растительностью и формированию почвенного покрова и т.д. Совокупное влияние этих процессов постепенно сглаживает перепады высот, характерные для областей с дражными отвалами, что приводит к увеличению сложности расчета объема на зарастающих, в течение долгого времени, областях с отвалами. В случае относительно не заросших участков, например на реке Джалинда, выделение отдельных отвалов затрудняется визуальной неоднородностью областей и их частичным зарастанием. Всё это приводит к значительным ошибкам при расчёте объёма. Для получения точной информации необходимы масштабные полевые работы с проверкой полученных данных на местности.

Авторы провели сравнение рассчитанного объёма на участках с дражными отвалами на реке Джалинда

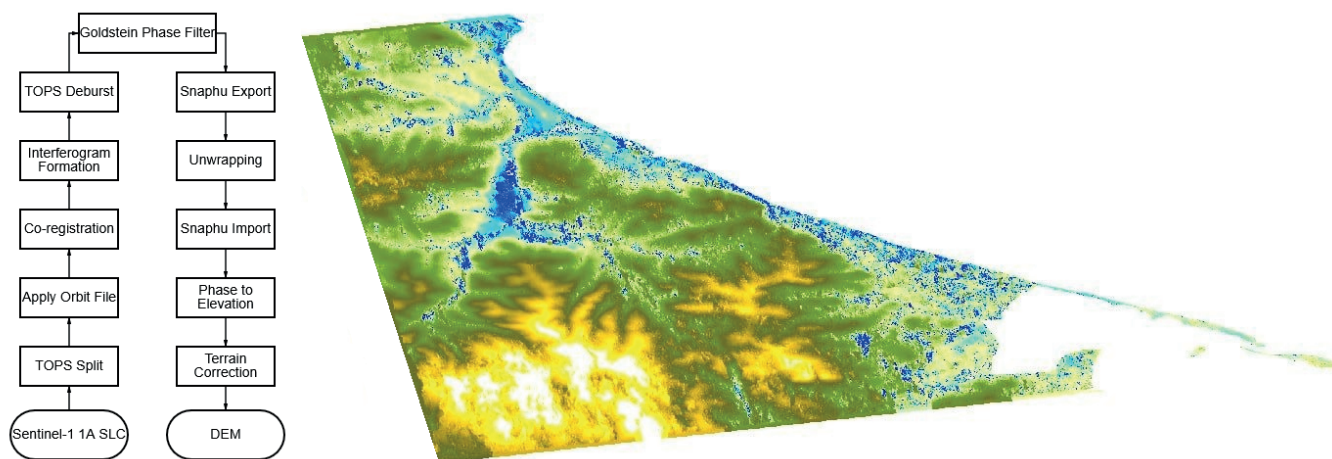


Рис. 4. Алгоритм расчета DEM по снимкам Sentinel-1 (слева) и полученная при низкой когерентности DEM (справа)

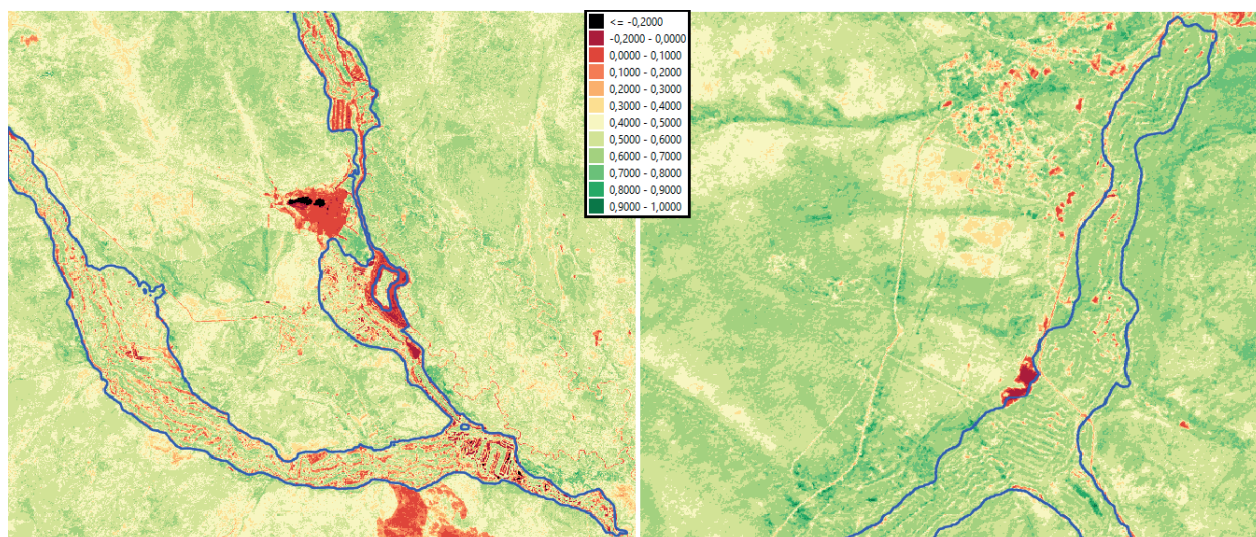


Рис. 5. Рассчитанный индекс EVI на территории с дражными отвалами на реке Джалинда (слева) и вблизи села Бриакан (справа)

и вблизи села Бриакан, полученных по данным разных цифровых моделей рельефа с вычитанием значений высоты растительности и без (табл. 1 и 2). В качестве базовой линии для расчета объёма используются минимальное, среднее и медианное значения высоты в каждом из полученных полигонов.

Экологические аспекты и состояние растительности

Изучению влияния добычи полезных ископаемых и её отходов на окружающую среду посвящены работы различных исследователей (Лупян и др., 2020; Schinteie et al., 2015; Sun et al., 2023; Worlanyo et al., 2021). Отходы в виде отвалов занимают большие территории и создают риски, такие как загрязнение почвы, растительности и воды из-за выщелачивания токсичных веществ.

Для косвенной оценки здоровья растительности использовался вегетационный индекс EVI, который является улучшенной версией NDVI для повышения чувствительности в условиях высокой плотности растительности и для коррекции влияния почвы и атмосферы. Он использует дополнительную информацию из синей (Blue) части спектра для уменьшения влияния аэрозолей и почвенного фона, что делает его более надёжным в сложных условиях. EVI рассчитывается по следующей формуле:

$$EVI = G * \frac{NIR - RED}{NIR + C_1 * RED - C_2 * BLUE + L},$$

где NIR, RED и BLUE – это коэффициенты отражения земной поверхности в ближнем инфракрасном, красном и синем спектральных диапазонах соответственно, G , C_1 , C_2 , L равны 2,5; 6; 7,5; 1. Такие коэффициенты обычно присваиваются при использовании данных спутника Sentinel-2 (Somvanshi, Kumari, 2020). На рисунке 5 представлены границы территорий с дражными отвалами и значения индекса EVI, рассчитанные по данным Sentinel-2. Полученные данные показывают, что несмотря на изменение русла реки вследствие разработки дражным методом значения EVI колеблются в пределах от 0,2 до 0,8, что свидетельствует о наличии растительности, за исключением ещё не заросших отдельных участков.

Проведенные ранее нами исследования указывали на то, что гале-эфельные отвалы подвержены естественному зарастанию, их поверхность в довольно короткий период покрывается растительностью, и со временем формируется многоярусный лес. Типы леса на исследуемых участках определены по данным портала Vega-science за 2024 год. Как показано на рисунке 6, тип леса на исследуемых территориях хвойный (в пойме р. Джалинды) и лиственный (на участках Кербинского узла). Точная оценка динамики и качества процессов естественного восстановления возможна с применением наземных полевых работ, планируемых на следующий полевой сезон.

Заключение

Проведённое исследование показало, что данные дистанционного зондирования Земли можно использовать для расчёта объёмов дражных отвалов, однако имеется ряд особенностей, значимо влияющих на точность оценки.

Сравнительный анализ различных цифровых моделей рельефа продемонстрировал существенные расхождения в результатах расчёта объёмов. На участке вблизи села Бриакан без учёта высоты растительности значения варьируют от $1,4 \text{ км}^3 \cdot 10^{-2}$ (ALOS) до $5 \text{ км}^3 \cdot 10^{-2}$ (ASTER), а на участке реки Джалинда – от $30 \text{ км}^3 \cdot 10^{-2}$ (ALOS, Copernicus) до $64 \text{ км}^3 \cdot 10^{-2}$ (ASTER). Такие значительные различия обусловлены особенностями самих моделей, сложностью рельефа исследуемых территорий и погрешностью выделенных границ.

Оценка объёма по данным DTM FABDEM и GEDTM показала меньшие значения для обоих участков, что может быть связано как с использованием моделей машинного обучения при их создании, в результате чего сглаживается рельеф, так и наоборот, с более точными значениями высот, что подробно рассмотрено в работе авторов модели GEDTM (Ho et al., 2025). Для более точной оценки необходимо использовать данные со спутниковых снимков и БПЛА; применение к ним методов фотограмметрии и их совмещение с данными спутниковых цифровых моделей рельефа позволит точнее рассчитывать объёмы отвалов (Alsayed, Nabawy, 2023).

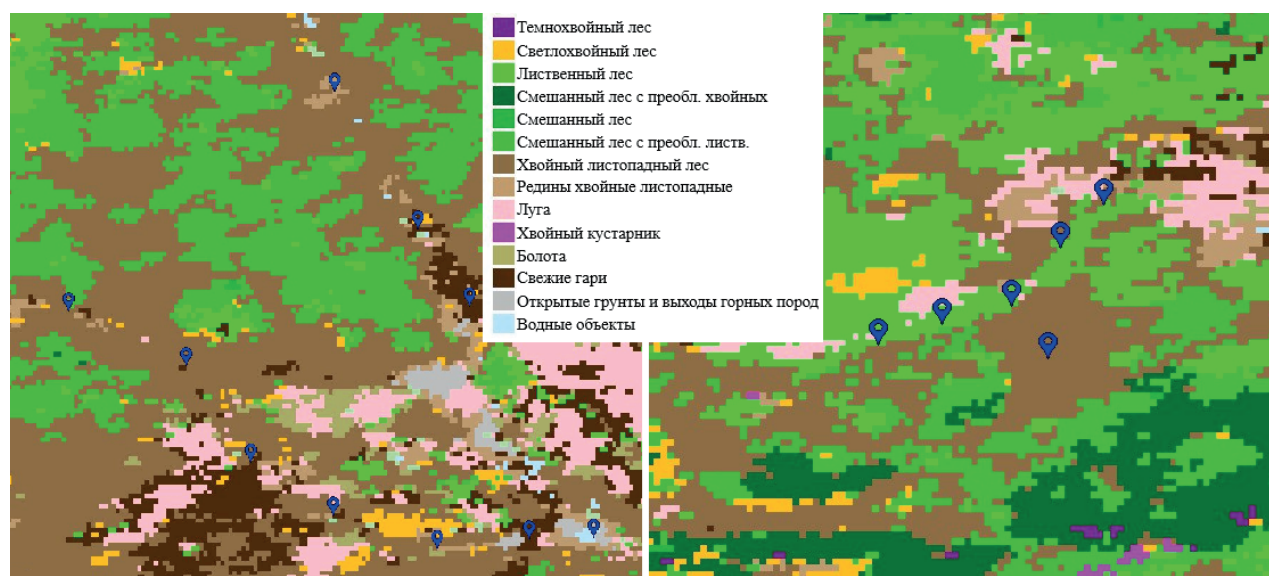


Рис. 6. Типы поверхности на исследуемых территориях дражных отвалов

	С учётом высоты деревьев			Без учёта высоты деревьев		
	Мин.	Сред.	Медиана	Мин.	Сред.	Медиана
ALOS	2,540	0,639	0,831	1,453	0,286	0,310
Copernicus	2,955	0,634	0,777	2,243	0,467	0,524
ASTER	5,528	1,016	1,067	5,002	0,872	0,869
FABDEM	0,837	0,193	0,210	-	-	-
GEDTM	1,505	0,271	0,283	-	-	-

Табл. 1. Объём территорий с дражными отвалами возле с. Бриакан, км³ · 10⁻²

	С учётом высоты деревьев			Без учёта высоты деревьев		
	Мин.	Сред.	Медиана	Мин.	Сред.	Медиана
ALOS	65,246	12,428	11,390	30,141	6,452	7,465
Copernicus	64,253	11,920	10,918	30,211	7,211	8,671
ASTER	89,136	14,946	14,742	64,001	10,519	10,848
FABDEM	15,086	4,023	4,511	-	-	-
GEDTM	24,398	5,195	5,842	-	-	-

Табл. 2. Объём территорий с дражными отвалами на р. Джалинда, км³ · 10⁻²

Разработанный модифицированный алгоритм построения диаграммы Вороного позволил эффективнее сегментировать протяжённые участки с дражными отвалами, что повысило точность расчётов при использовании различных базовых линий. Однако на точность оценки объёмов существенно влияют такие факторы, как зарастание отвалов растительностью, эрозионные процессы и аккумуляция наносов, что особенно заметно на старых участках разработки.

Расчет карты высот на основе снимков Sentinel-1 показал низкую когерентность (0–0,4) из-за обилия растительности и динамических изменений на выбранных территориях, что делает данный метод малоприменимым для решения поставленной задачи. Стоит отметить, что поиск подходящих снимков – довольно трудоёмкий процесс, и сложно подобрать изображения, подходящие по параметрам временной базовой линии и пространственной базовой линии, что также не гарантирует получение соответствующей модели рельефа с высоким пространственным разрешением.

Среди рассмотренных моделей наиболее перспективными для оценки объёмов дражных отвалов представляются модели FABDEM и GEDTM, так как они обеспечивают более точную оценку рельефа при наличии растительного покрова.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на комбинирование различных источников данных, включая наземные измерения на ключевых участках для калибровки моделей, а также на разработку специализированных алгоритмов, учитывающих особенности формирования и изменения дражных отвалов со временем.

Авторы отмечают необходимость проведения полевых исследований для оценки точности разработанных методов, а также более полного анализа текущей ситуации на исследуемых территориях и планируют провести натурные наблюдения в следующем вегетационном сезоне.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 24-11 20029, <https://rscf.ru/project/24-11-20029/> и гранта Правительства Хабаровского края (Соглашение № 107С/2024 от 31.07.2024 г.).

Литература

- Литвинцев В.С., Усиков В.И., Озарян Ю.А., Алексеев В.С. (2021). Метод дистанционного зондирования Земли в составе работ по оценке объемов техногенного сырья и экологической обстановки при эксплуатации россыпей. *Георесурсы*, 23(4), с. 116–123. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.13>
- Лурия Е.А., Константинова А.М., Балашов И.В., Кашницкий А.В., Саворский В.П., Панова О.Ю. (2020). Разработка системы анализа состояния окружающей среды в зонах расположения крупных промышленных объектов, хвостохранилищ и отвалов. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 17(7), с. 243–261. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-243-261>
- Мирзаханов Г.С., Мирзаханова З.Г. (2013). Ресурсный потенциал техногенных образований россыпных месторождений золота. Москва: ООО «МАКС Пресс», 288 с.
- Озарян Ю.А. (2019). ГИС-технологии – инструмент оценки возможности естественного восстановления растительности на нарушенных горными работами участках. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, (S37), с. 543–550. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-543-550>
- Alsayed, A., Nabawy, M.R. (2023). Stockpile volume estimation in open and confined environments: a review. *Drones*, 7(8), 537. <https://doi.org/10.3390/drones7080537>
- European Environment Agency (2020). Copernicus Digital Elevation Model (Copernicus DEM). <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem>
- Ho Y.F., Grohmann C.H., Lindsay J., Reuter H.I., Parente L., Witjes M., Hengl T. (2025). Global Ensemble Digital Terrain modeling and parametrization at 30 m resolution (GEDTM30): a data fusion approach based on ICESat-2, GEDI and multisource data. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6280607/v1>
- Khasanov K. (2020). Evaluation of ASTER DEM and SRTM DEM data for determining the area and volume of the water reservoir. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 883(1), 012063. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012063>
- Li H., Zhao J., Yan B., Yue L., Wang L. (2022). Global DEMs vary from one to another: an evaluation of newly released Copernicus, NASA and AW3D30 DEM on selected terrains of China using ICESat-2 altimetry data. *International Journal of Digital Earth*, 15(1), pp. 1149–1168. <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2094002>
- Marsh C.B., Harder P., Pomeroy J.W. (2023). Validation of FABDEM, a global bare-earth elevation model, against UAV-lidar derived elevation in a complex forested mountain catchment. *Environmental Research Communications*, 5(3), 031009. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/acc56d>
- Schintzie R., Pinetown K., Douglas G., Sestak S. (2015). Literature review of dissolved hydrocarbons in groundwater with emphasis on the Australian Surat and Bowen basins. CSIRO, Australia, 86 p.
- Simard M., Pinto N., Fisher J.B., Baccini A. (2011). Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G4). <https://doi.org/10.1029/2011JG001708>
- Somvanshi S.S., Kumari M. (2020). Comparative analysis of different vegetation indices with respect to atmospheric particulate pollution using

sentinel data. *Applied Computing and Geosciences*, 7, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2020.100032>

Sun W., Liu S., Wang M., Zhang X., Shang K., Liu Q. (2023). Soil copper concentration map in mining area generated from AHSI remote sensing imagery. *Science of The Total Environment*, 860, 160511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160511>

Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Danielson, J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J., Abrams, M. and Crippen, R. (2011). ASTER Global Digital Elevation Model Version 2. Tokyo: Ministry of Economy, Trade and Industry and National Aeronautics and Space Administration.

Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. (2014). Precise global DEM generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2, pp. 71–76. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-71-2014>

Takaku, J., Tadono, T. and Tsutsui, K. (2014). Generation of high resolution global DSM from ALOS PRISM, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-4, pp. 243–248. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-243-2014>

Worlanyo A.S., Jiangfeng L. (2021). Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review. *Journal of Environmental Management*, 279, 111623. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>

Yang L., Meng X., Zhang X. (2011). SRTM DEM and its application advances. *International Journal of Remote Sensing*, 32(14), pp. 3875–3896. <https://doi.org/10.1080/01431161003786016>

Сведения об авторах

Роман Артурович Секриеру – инженер, Вычислительный центр ДВО РАН – обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН

Россия, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, д. 65
e-mail: roma.sekrieru@gmail.com

Юлия Александровна Озарян – ведущий научный сотрудник, кандидат техн. наук, Институт горного дела ДВО РАН – обособленное подразделение ХФИЦ ДВО РАН

Россия, 680000, Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51
e-mail: ozaryanigd@gmail.com

Статья поступила в редакцию 22.05.2025;

Принята к публикации 13.02.2026; Опубликована 30.06.2026

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Assessment of the Environmental Impact of Placer Mining Using Remote Sensing Data

R.A. Sekrieru¹, Yu.A. Ozaryan^{2*}

¹Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

²Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

*Corresponding author: Yulia A. Ozaryan, e-mail: ozaryanigd@gmail.com

Abstract. The article examines a methodology for calculating the volume of territories with dredge tailings formed as a result of alluvial deposits mining in the Russian Far East, using remote sensing data. The study considers the application of digital elevation models SRTM, ASTER, ALOS, Copernicus, FABDEM and GEDTM. The modified algorithm of Voronoi diagram construction was used for segmentation of territories with dredge dumps, which allows to increase the accuracy of calculations in conditions of considerable length and heterogeneity of relief. A comparative analysis of the result of volume calculation was conducted for two sites – near the village of Briakan (Khabarovsk Krai) and Dzhhalinda River (Amur Oblast) – with and without taking into account the height of vegetation cover was carried out.

The study identifies limitations of application of different digital elevation models and ways to improve the accuracy of estimation of the volume of territories with dredge tailings were proposed, which is important both for the assessment of environmental impact and for planning of potential recycling of anthropogenic formations.

Keywords: placer deposits, alluvial gold mining, tailings, vegetation health, remote sensing, digital elevation model

Recommended citation: Sekrieru R.A., Ozaryan Yu.A. (2026). Assessment of the Environmental Impact of Placer Mining Using Remote Sensing Data. *Georesursy = Georesources*, 28(2), pp. 236–244. <https://doi.org/10.18599/grs.2026.2.17>

References

Alsayed, A., Nabawy, M.R. (2023). Stockpile volume estimation in open and confined environments: a review. *Drones*, 7(8), 537. <https://doi.org/10.3390/drones7080537>

European Environment Agency (2020). Copernicus Digital Elevation Model (Copernicus DEM). <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem>

Ho Y.F., Grohmann C.H., Lindsay J., Reuter H.I., Parente L., Witjes M., Hengl T. (2025). Global Ensemble Digital Terrain modeling and parametrization at 30 m resolution (GEDTM30): a data fusion approach based on ICESat-2, GEDI and multisource data. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6280607/v1>

Khasanov K. (2020). Evaluation of ASTER DEM and SRTM DEM data for determining the area and volume of the water reservoir. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 883(1), 012063. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012063>

Li H., Zhao J., Yan B., Yue L., Wang L. (2022). Global DEMs vary from one to another: an evaluation of newly released Copernicus, NASA and AW3D30 DEM on selected terrains of China using ICESat-2 altimetry data. *International Journal of Digital Earth*, 15(1), pp. 1149–1168. <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2094002>

Litvintsev V.S., Usikov V.I., Ozaryan Yu.A., Alekseev V.S. (2021). Remote sensing of the Earth as a part of research of assessing the volume of technogenic raw and the environmental situation during the exploitation of placers. *Georesursy = Georesources*, 23(4), pp. 116–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.13>

Loupian E.A., Konstantinova A.M., Balashov I.V., Kashnitskii A.V., Savorskiy V.P., Panova O.Yu. (2020). Development of a system for analyzing the state of environment in areas of large industrial facilities, tailings and dumps. *Sovremennyye problemy distantsionnoy zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 17(7), pp. 243–261. (In Russ.) <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-243-261>

Marsh C.B., Harder P., Pomeroy J.W. (2023). Validation of FABDEM, a global bare-earth elevation model, against UAV-lidar derived elevation in a complex forested mountain catchment. *Environmental Research Communications*, 5(3), 031009. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/acc56d>

Mirzehanov G.S., Mirzehanova Z.G. (2013). Resource potential of technogenic formations of placer gold deposits. Moscow: OOO «MAKS Press», 288 p. (In Russ.)

Ozaryan Yu.A. (2019). GIS technologies - a tool for evaluating the potential natural ecological restoration on mining-disturbed lands. *Gorny Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, (S37), pp. 543–550. (In Russ) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-543-550>

Schintzie R., Pinetown K., Douglas G., Sestak S. (2015). Literature review of dissolved hydrocarbons in groundwater with emphasis on the Australian Surat and Bowen basins. CSIRO, Australia, 86 p.

Simard M., Pinto N., Fisher J.B., Baccini A. (2011). Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G4). <https://doi.org/10.1029/2011JG001708>

Somvanshi S.S., Kumari M. (2020). Comparative analysis of different vegetation indices with respect to atmospheric particulate pollution using sentinel data. *Applied Computing and Geosciences*, 7, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2020.100032>

Sun W., Liu S., Wang M., Zhang X., Shang K., Liu Q. (2023). Soil copper concentration map in mining area generated from AHSI remote sensing imagery. *Science of The Total Environment*, 860, 160511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160511>

Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., Iwasaki, A., Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Danielson, J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J., Abrams, M. and Crippen, R. (2011). ASTER Global Digital Elevation Model Version 2. Tokyo: Ministry of Economy, Trade and Industry and National Aeronautics and Space Administration.

Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. (2014). Precise global DEM generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2, pp. 71–76. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-71-2014>

Takaku, J., Tadono, T. and Tsutsui, K. (2014). Generation of high resolution global DSM from ALOS PRISM, *ISPRS Annals of the*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-4, pp. 243–248. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-243-2014>

Worlanyo A.S., Jiangfeng L. (2021). Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review. *Journal of Environmental Management*, 279, 111623. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>

Yang L., Meng X., Zhang X. (2011). SRTM DEM and its application advances. *International Journal of Remote Sensing*, 32(14), pp. 3875–3896. <https://doi.org/10.1080/01431161003786016>

About the Authors

Roman A. Sekrieru – Engineer, Computing Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
65 Kim Yu Chen St., Khabarovsk, 680000, Russian Federation
e-mail: roma.sekrieru@gmail.com

Yulia A. Ozaryan – Leading researcher, Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
51 st. Turgeneva, Khabarovsk, 680000, Russian Federation
e-mail: ozaryanigd@gmail.com

Manuscript received 22 May 2026;

Accepted 13 February 2026; Published 30 June 2026

© 2026 The Authors. This article is published in open access under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)