Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

# ENGINEERING APPLICATIONS

UDC 622.1:528.7:004.932

## Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Lomakina N.E., Dolbin I.D. Influence of Airborne Laser Scanning Point Cloud Filtering on the Accuracy of Mining Volume Estimation

Влияние фильтрации облака точек воздушного лазерного сканирования на точность определения объёмов горных работ

**Arno Veronika Vladimirovna**
Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan
**Kolesnichenko Eva Pavlovna**
Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow
**Lomakina Natalia Evgenievna**,
Senior Lecturer of the Department of Hygiene and Public Health,
Senior Lecturer of the Department of ETS,
North-Eastern Federal University, Magadan.
**Dolbin Ivan Dmitrievich,**
Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan
Арно Вероника Владимировна
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО
Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 4 курса
направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г.Москва
Ломакина Наталья Евгеньевна,
Старший преподаватель кафедры ГиГД
ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Долбин Иван Дмитриевич,
Студент 4 курса
Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

***Abstract.*** *A reproducible experiment examines how ground classification, point density and interpolation affect two-epoch mining volume estimates. Two point clouds contain 161,669 and 162,333 points over a 100 × 100 m area, with independent 0.03 m height noise and different above-ground cover. Unclassified data and three custom morphological schemes are compared; they are not presented as implementations of CSF, PMF or SMRF. For a reference volume of 19,570.757 m³, signed-volume errors are 6.887%, 1.985%, 2.543% and 0.189%. Aggressive filtering removes up to 42.64% of true ground points in the second epoch. Volume bias equals area multiplied by the difference between the two mean surface errors. A small net error therefore does not prove local accuracy. An additional 0.03 m inter-epoch offset introduces 300 m³ independently of filtering. All data are hypothetical and require field validation.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

***Keywords:*** *airborne laser scanning, point cloud, ground filtering, digital terrain model, mining volume, classification error, interpolation, systematic bias.*

***Аннотация.*** *Исследовано влияние ошибок классификации грунта, разрежения и интерполяции на двухэпоховый расчёт объёма горных работ. На площадке 100 × 100 м сформированы два облака по 161 669 и 162 333 точек с независимым шумом высоты 0,03 м, неодинаковой плотностью и разной долей надземных отражений. Сравнены исходное облако и три воспроизводимые авторские морфологические схемы; они не выдаются за реализации CSF, PMF или SMRF. При эталонном объёме 19 570,757 м³ относительная ошибка знаковой разности составляет 6,887; 1,985; 2,543 и 0,189 % соответственно. Жёсткая фильтрация удаляет до 42,64 % истинных грунтовых точек второй эпохи и увеличивает площадь интерполяции. Показано, что ошибка объёма определяется разностью средних ошибок двух поверхностей; малый итоговый процент не доказывает локального качества. Межэпоховый сдвиг 0,03 м добавляет 300 м³ ошибки независимо от фильтра. Все данные модельные; выводы требуют натурной проверки.*

***Ключевые слова:*** *воздушное лазерное сканирование, облако точек, фильтрация грунта, цифровая модель рельефа, объём горных работ, ошибка классификации, интерполяция, систематическое смещение.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

### *Введение*

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) позволяет получать пространственные данные о карьерах и отвалах, но точность итогового объёма не определяется только паспортной погрешностью дальномера. Между измеренной дальностью и производственным отчётом находятся траекторная обработка, уравнивание полос, классификация, построение поверхности, выбор границы и интегрирование. Ошибка на одной стадии может маскироваться компенсацией на другой. В настоящей работе рассматривается прежде всего выделение поверхности грунта и его влияние на объём.

Braun и соавторы на участке горных работ сравнивают геометрические и структурные фильтры и показывают различие ошибок удаления грунта и сохранения растительности [1]. Klápště и соавторы устанавливают зависимость результата от параметров, уклона, растительности и типа облака [2]. Chen и соавторы подтверждают отсутствие универсального лучшего алгоритма на сложных ландшафтах [3]. Численные показатели этих исследований не принимаются за характеристики оборудования или данного модельного объекта.

Štroner и соавторы исследуют удаление растительности на крутом уступе и отмечают потерю геометрических деталей; их исходные данные фотограмметрические, поэтому перенос результатов на ВЛС допустим лишь на уровне постановки проблемы [4]. Petras и соавторы рассматривают неоднородность плотности, пропуски и полосовые эффекты ВЛС [5]. Cai и соавторы предлагают ICSF с адаптацией к рельефу [6], Zheng и соавторы — адаптивную начальную сетку для PTD [7]. Эти работы обосновывают отдельный контроль плотности и сохранности изломов.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Oniga и соавторы показывают возможности сочетания робастного и объёмного подходов при построении DTM по LiDAR-UAS [8]. Liang и соавторы объединяют CSF и TIN для сложной городской среды [9]; именно городская область применения не позволяет объявить результат подтверждением на карьере. Обзор Alsayed и Nabawy связывает точность объёмов с геометрией объекта, базовой поверхностью и технологией измерения [10].

Цель исследования — выполнить контролируемый вычислительный эксперимент, в котором известны истинная поверхность и принадлежность каждой точки, а настройки фильтрации меняются без изменения исходного облака. Методический вклад — одновременный анализ ошибок классов, высот, интерполяционного покрытия и разности объёмов. Разработка нового универсального фильтра, натурная апробация конкретного лидара и подтверждение нормативной точности не заявляются.

***Границы постановки***

ВЛС понимается широко, включая лазерное сканирование с БПЛА. Синтетические облака воспроизводят геометрические признаки возвратов, но не полную физику сканера, номер отражения и траекторию полёта. Двухэпоховый контур и координатная система фиксированы; ошибка совмещения сначала исключена, затем рассмотрена отдельным сценарием. Результат не относится к действующему предприятию.

***Материалы и методы. Синтетические облака и эталон***

Расчётная область — квадрат 100 × 100 м. Поверхность до работ z0 = 0,02x + 0,015y + 0,15sin(x/12)cos(y/15). После работ z1 = z0 − d(x,y). Глубина задана через трапецеидальные функции Rx, Ry и локальный сохранившийся гребень q(y):

$$d(x,y) = 1 + 3R_x(x)R_y(y) - 0{,}8exp[-((x-52)/1{,}7)^2]q(y) \quad (1)$$

Rx равна нулю вне [23;77] м и единице на [25;75] м, переходы линейны; Ry — нулю вне [18;82] м и единице на [20;80] м. q равна нулю вне [25;70] м, единице на [28;67] м, переходы линейны. Гребень проверяет сохранность узкой положительной формы. Отвесные стенки и нависания не моделируются: поверхность однозначна по x, y.

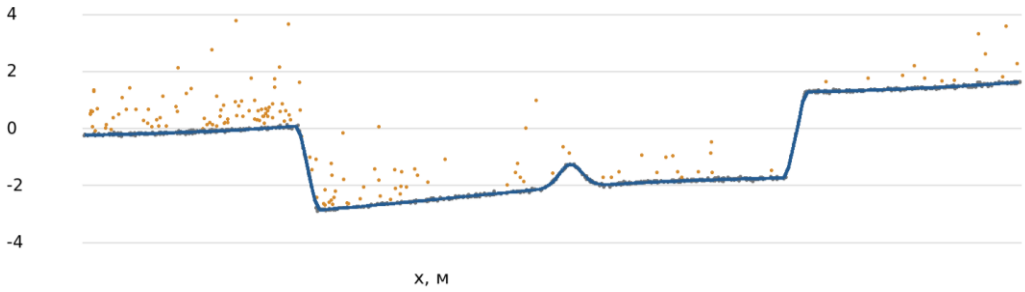
Таблица 1

Параметры генерации

| Показатель | Значение |
|---|---|
| Площадь; расчётная ячейка | 10 000 м²; 0,5 × 0,5 м; 40 000 ячеек |
| Число точек: эпохи 0 / 1 | 161 669 / 162 333 |
| Истинные грунтовые точки: 0 / 1 | 113 557 / 141 632 |
| Плотность исходного облака: 0 / 1 | 16,17 / 16,23 точки/м² в среднем |
| Погрешность высоты | N(0; 0,03² м²), независима |
| Надземные отражения | Добавка 0,15 м + Exp(среднее 0,65 м) |
| Инициализация генераторов | 20261022 / 20261023 |
| Эталон | Аналитические поверхности и известные метки |

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Число возвратов по ячейкам пуассоновское: $\lambda = (3{,}5 + 1{,}5\sin^2(x/13))[1 - 0{,}45\mathrm{I}(x>75, y>60)]$. Координаты внутри ячейки равномерны. Базовая вероятность надземного отражения равна 0,20 и 0,08 по эпохам; она увеличена в двух локальных участках. Низкие выбросы, ошибки x,y и межполосные сдвиги в базовом опыте не добавляются. Метки и эталон не используются самим фильтром.




Синий — истинный профиль; серый — грунт; оранжевый — объекты над грунтом.

Рисунок 1 — Профиль y ≈ 50 м; источник

***Материалы и методы. Фильтрация и оценка качества***

По каждой ячейке формируется минимум M0. Пустые ячейки этой начальной поверхности заполняются ближайшим значением только для выполнения морфологической операции. Опорная поверхность Fr получается раскрытием квадратным элементом Br, после чего каждая исходная точка классифицируется по вертикальному остатку:

$$M_0(c) = min\{z_i : i \in c\};\ F_r = (M_0 \ominus B_r) \oplus B_r \quad (2)$$

$$G_i = 1\{z_i - F_r(c_i) \le \tau(c_i)\};\ \tau_{ad} = 0{,}10 + min\{0{,}65; 0{,}70s\} \quad (3)$$

s — модуль градиента Fr, м/м; коэффициент 0,70 имеет размерность метра. Классификация односторонняя: изолированные низкие выбросы данной схемой не подавляются; их нет в генераторе. Эти три авторских режима не являются полными реализациями CSF, PMF, SMRF, ICSF или AGPTD и не сравниваются с ними по быстродействию или рейтингу.

Таблица 2

Настройки одной морфологической схемы

| Режим | Квадратное окно | Порог τ |
|---|---|---|
| Мягкий | 7 × 7 ячеек, сторона 3,5 м | 0,60 м |
| Жёсткий | 25 × 25 ячеек, сторона 12,5 м | 0,08 м |
| Адаптивный | 7 × 7 ячеек, сторона 3,5 м | 0,10 + min(0,65; 0,70s), м |

$$DTM(c) = \frac{\sum G_i z_i}{\sum G_i}, i \in c,\ \sum G_i > 0 \quad (4)$$

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

После отбора DTM равна средней высоте выбранных точек ячейки. Остальные ячейки линейно интерполируются по центрам непустых ячеек через триангуляцию; вне выпуклой оболочки используется ближайшая ячейка. Доля пустот фиксируется до заполнения. Все режимы используют один интерполятор и один контур. Это условие вычислительного сравнения, не разрешение производственно заполнять любые пропуски без контроля.

$$E_{FN} = \frac{FN}{N_{ground}};\ E_{FP} = \frac{FP}{N_{non-ground}} \quad (5)$$

$$b = \frac{1}{n}\sum e_j;\ RMSE = \sqrt{(\frac{\sum {e_j}^2}{n})};\ e_j = DTM_j - z_j, true \quad (6)$$

FN — удалённый истинный грунт, FP — надземная точка, принятая за грунт. Знаменатели определены явно: в литературе обозначения ошибок I и II могут различаться [3, 4]. Высоты проверяются по всем 40 000 эталонным ячейкам; они не считаются 40 000 независимых натурных контрольных измерений. Параметры заданы для проверки механизмов, не подбирались по минимальному объёму на скрытом тесте.

***Результаты. Классификация, высоты и пропуски***

Таблица 3

Результаты по эпохам: 0 — до, 1 — после работ

| Режим / эпоха | FN, % | FP, % | b, м | RMSE, м | Пустоты, % |
|---|---|---|---|---|---|
| Без классификации / 0 | 0,00 | 100,00 | 0,2348 | 0,3879 | 2,71 |
| Без классификации / 1 | 0,00 | 100,00 | 0,1000 | 0,2286 | 2,65 |
| Мягкий / 0 | 0,00 | 45,86 | 0,0567 | 0,1085 | 4,55 |
| Мягкий / 1 | 0,69 | 44,33 | 0,0179 | 0,0649 | 3,45 |
| Жёсткий / 0 | 24,84 | 0,00 | -0,0132 | 0,0262 | 17,24 |
| Жёсткий / 1 | 42,64 | 0,00 | -0,0629 | 0,1465 | 27,47 |
| Адаптивный / 0 | 2,65 | 0,07 | -0,0016 | 0,0198 | 8,70 |
| Адаптивный / 1 | 4,90 | 1,91 | -0,0053 | 0,0497 | 5,56 |

По таблице 3 отсутствие классификации оставляет все надземные точки. Мягкий режим сохраняет почти весь грунт, но также 44–46 % надземных отражений. Жёсткий режим практически устраняет примесь, однако удаляет 24,84 и 42,64 % грунта в двух эпохах. Поверхность после работ теряет больше геометрических деталей; заполнение пропусков становится самостоятельным источником ошибки.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

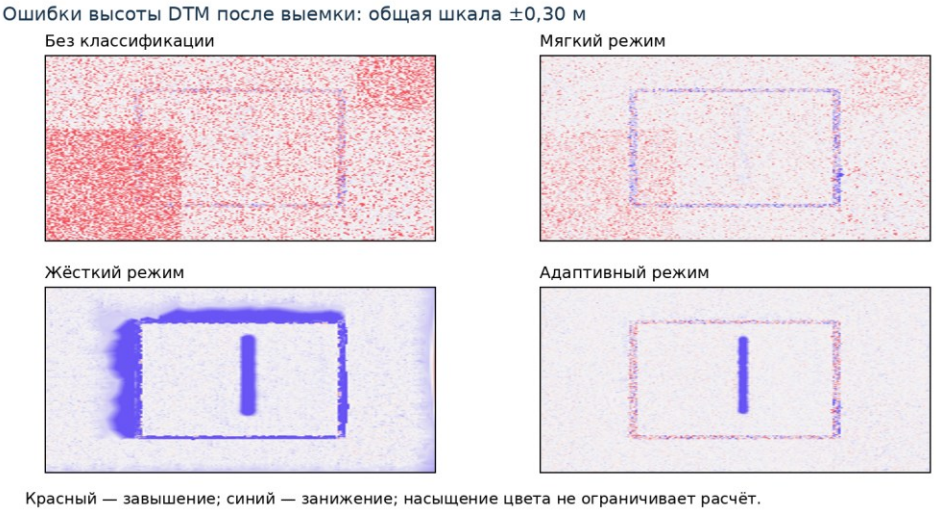



Рисунок 2 — Ошибки DTM второй эпохи; цвета обрезаны по ±0,30 м только для визуализации

Рисунок 2 показывает пространственный характер ошибки. Адаптивный режим сохраняет больше склоновых точек, но тоже не безошибочен. Для него RMSE составляет 0,0198 м до и 0,0497 м после работ. Малый средний остаток не исключает локальной ошибки у гребня или бровки; требуются профильный и площадной контроль, а не только одно сводное число [5–8].

***Результаты. Объём и проверяемый расчёт***

$$V_{cut} = a\sum max(\Delta z, 0);\ V_{fill} = a\sum max(-\Delta z, 0);\ V_{net} = a\sum \Delta z \quad (7)$$

△z = DTM0 − DTM1, a = 0,25 м². Сравнивается знаковый объём Vnet = Vcut − Vfill; раздельные выемка и насыпь также сохраняются. Эталонная геометрия содержит только выемку. Ложная насыпь в исходном облаке не обнуляется скрыто.

$$V_{ref} = 10\,000 + 3 \cdot 52 \cdot 62 - 0{,}8 \cdot 1{,}7\sqrt{\pi} \cdot 42 = 19\,570{,}757\ \text{м}^3 \quad (8)$$

В (8) интегралы Rx и Ry равны 52 и 62 м, q — 42 м. Краевые хвосты гауссовой формы за пределами площадки пренебрежимо малы. Интеграл аналитической глубины и сумма по заданной сетке совпадают до машинной точности для этой геометрии; это не общее свойство дискретизации любых карьеров.

Таблица 4

Объёмы при общем контуре

| **Режим** | **Vcut, м³** | **Vfill, м³** | **Vnet, м³** | **δVnet, %** |
|---|---|---|---|---|
| Без классификации | 20931,98 | 13,36 | 20918,62 | 6,887 |
| Мягкий | 19959,23 | 0,00 | 19959,23 | 1,985 |
| Жёсткий | 20068,35 | 0,00 | 20068,35 | 2,543 |
| Адаптивный | 19607,76 | 0,00 | 19607,76 | 0,189 |

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$\Delta V = A(b_0 - b_1) \quad (9)$$

Равенство (9) точное для общих равновеликих ячеек и полного расчётного контура. Для адаптивного режима b0 = −0,00158552 м и b1 = −0,00528542 м. Разность 0,003699904 м на площади 10 000 м² даёт ΔV = 36,999 м³. Следовательно, Vnet = 19 607,756 м³ и δV = 0,189053 %. Для жёсткого режима разность средних ошибок равна 0,04975931 м, откуда ΔV = 497,593 м³.

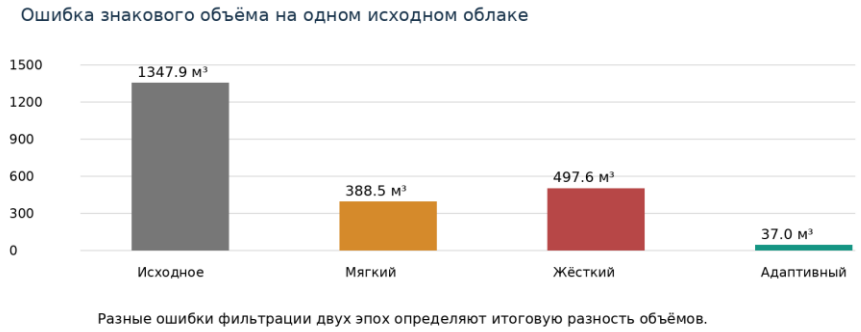



Рисунок 3 — Ошибка знакового объёма; источник — вычислительный эксперимент

По таблице 4 и рисунку 3 жёсткое удаление объектов хуже мягкого режима по объёму, хотя FP почти нулева. Причина — несимметричная потеря грунта между эпохами. Этот вывод относится к выбранным настройкам и не является рейтингом известных программных фильтров.

***Результаты. Чувствительность к порогу и плотности***

В адаптивном режиме изменён только базовый порог τ0 при неизменных окне, облаках и интерполяции. Вклад уклона сохраняется. Полученные точки характеризуют чувствительность, а не статистически доказанный универсальный оптимум; отдельной натурной проверочной площадки не было.




Рисунок 4 — Ошибка Vnet при изменении τ0; прочие параметры фиксированы

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

На рисунке 4 минимум среди пяти заданных порогов получен при 0,10 м: 0,189 %. При 0,05 и 0,20 м ошибки равны 0,247 и 0,237 %, а при 0,60 м — 1,877 %. Слишком большой порог возвращает надземную примесь. При этом RMSE второй эпохи при $\tau 0$ = 0,20 м составляет 0,0459 м и меньше, чем при 0,10 м; критерии качества поверхности одной эпохи и разности объёмов не тождественны.

Таблица 5

Прореживание исходных облаков с повтором всей адаптивной обработки

| Оставлено точек | Плотность 0 / 1, точек/м² | Пустоты 0 / 1, % | RMSE1, м | δVnet, % |
|---|---|---|---|---|
| 100 % | 16,17 / 16,23 | 8,70 / 5,56 | 0,0497 | 0,189 |
| 50 % | 8,10 / 8,14 | 26,97 / 20,04 | 0,0575 | 0,214 |
| 25 % | 4,05 / 4,07 | 50,47 / 43,46 | 0,0637 | 0,214 |

По таблице 5 оставление 25 % исходных точек увеличивает пустоты до 50,47 и 43,46 % ячеек, а RMSE после работ — до 0,0637 м. При этом ошибка объёма меняется лишь до 0,214 %. Это не доказательство достаточности разреженной съёмки: интегральная компенсация и интерполяция способны скрыть локальную потерю рельефа. Прореживание выполнено однократно для каждого уровня; вероятностная устойчивость по многим повторениям здесь не оценена.

Плотность сама по себе не гарантирует качество [5]. Для поля необходимо фиксировать пространственное распределение грунтовых возвратов, максимальный размер пропуска и расстояние до фактических точек, а не заменять эти характеристики средним числом точек на квадратный метр.

### *Обсуждение и оценка неопределённости*

$$\sigma^2{}_V = a^2 1^{\mathrm{T}} \Sigma_{\Delta z} 1;\ \Sigma_{\Delta z} = \Sigma_0 + \Sigma_1 - \Sigma_{01} - \Sigma_{10} \quad (10)$$

В (10) учитываются пространственная и межэпоховая ковариации. Если ошибочно принять независимые ячейки с $\sigma\Delta z$ = 0,05 м, получим $\sigma V$ = 0,25 × 0,05 × $\sqrt{40\ 000}$ = 2,5 м³. Однако межэпоховый сдвиг 0,03 м даёт 300 м³, или 1,533 % эталона; вместе с базовой ошибкой адаптивной схемы — около 1,722 %. Фильтрация не исправляет ошибку совмещения. Число точек облака нельзя подставлять вместо числа независимых наблюдений.

Низкая ошибка Vnet может быть следствием компенсации завышений и занижений; одинаковое смещение двух эпох способно сократиться в разности. Для независимой оценки нужны контроль основы и полос, профили по бровкам, стратифицированные проверки на открытом грунте и в растительности, карты пустот и сравнение с независимой съёмкой. Заданный в симуляции эталон заменяет такую проверку только внутри вычислительного эксперимента [1–3, 8].

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Практический выбор не следует сводить к минимальному FN, FP или RMSE по одному классу. Необходимо совместно проверить сохранность форм, раздельные объёмы, геометрические ограничения и пригодность интерполяции. Реальные нависающие поверхности требуют 3D-подхода, а не одной высоты на ячейку. Результаты городских, лесных и маломасштабных опытов [6–10] не устанавливают допустимых ошибок горного учёта.

Ограничения: не моделируются физика луча, отрицательные выбросы, плановые ошибки, вода, снег и ошибка границы. Относительная ошибка получена на одной аналитической сцене, а не на серии полевых объектов. Для внедрения нужны натурные данные, независимая настройка и испытание, исходные LAS/LAZ, журнал обработки, контрольные точки и обоснованный бюджет неопределённости.

***Выводы***

1. На синтетическом облаке показано раздельное влияние классификации, пропусков и интерполяции. Три авторских режима не выдаются за реализации известных программных алгоритмов.

2. При эталоне 19 570,757 м³ ошибки Vnet равны 6,887 % без классификации, 1,985 % в мягком, 2,543 % в жёстком и 0,189 % в адаптивном режиме.

3. Жёсткая фильтрация удаляет 42,64 % грунта второй эпохи; малый FP не обеспечивает точный объём. Ошибка объёма зависит от разности средних ошибок двух поверхностей.

4. Прореживание до 25 % точек сохраняет малую ошибку Vnet при резком росте пустот. Интегральное совпадение нельзя считать подтверждением локальной точности.

5. Межэпоховый сдвиг 0,03 м на 1 га добавляет 300 м³. Результаты модельные и требуют отдельной проверки точности совмещения и натурной валидации.

## References

1. Braun J., Braunová H., Suk T., Michal O., Peťovský P., Kuric I. Structural and Geometrical Vegetation Filtering — Case Study on Mining Area Point Cloud Acquired by UAV Lidar // Acta Montanistica Slovaca. — 2021. — Vol. 26, no. 4. — P. 661–674. — DOI: 10.46544/AMS.v26i4.06.

2. Klápště P., Fogl M., Barták V., Gdulová K., Urban R., Moudrý V. Sensitivity analysis of parameters and contrasting performance of ground filtering algorithms with UAV photogrammetry-based and LiDAR point clouds // International Journal of Digital Earth. — 2020. — Vol. 13, no. 12. — P. 1672–1694. — DOI: 10.1080/17538947.2020.1791267.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

3. Chen C., Guo J., Wu H., Li Y., Shi B. Performance Comparison of Filtering Algorithms for High-Density Airborne LiDAR Point Clouds over Complex LandScapes // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13, no. 14. — Art. 2663. — DOI: 10.3390/rs13142663.

4. Štroner M., Urban R., Lidmila M., Kolář V., Křemen T. Vegetation Filtering of a Steep Rugged Terrain: The Performance of Standard Algorithms and a Newly Proposed Workflow on an Example of a Railway Ledge // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13, no. 15. — Art. 3050. — DOI: 10.3390/rs13153050.

5. Petras V., Petrasova A., McCarter J. B., Mitasova H., Meentemeyer R. K. Point Density Variations in Airborne Lidar Point Clouds // Sensors. — 2023. — Vol. 23, no. 3. — Art. 1593. — DOI: 10.3390/s23031593.

6. Cai S., Yu S., Hui Z., Tang Z. ICSF: An Improved Cloth Simulation Filtering Algorithm for Airborne LiDAR Data Based on Morphological Operations // Forests. — 2023. — Vol. 14, no. 8. — Art. 1520. — DOI: 10.3390/f14081520.

7. Zheng J., Xiang M., Zhang T., Zhou J. An Improved Adaptive Grid-Based Progressive Triangulated Irregular Network Densification Algorithm for Filtering Airborne LiDAR Data // Remote Sensing. — 2024. — Vol. 16, no. 20. — Art. 3846. — DOI: 10.3390/rs16203846.

8. Oniga V.-E., Loghin A.-M., Macovei M., Lazar A.-A., Boroianu B., Sestras P. Enhancing LiDAR-UAS Derived Digital Terrain Models with Hierarchic Robust and Volume-Based Filtering Approaches for Precision Topographic Mapping // Remote Sensing. — 2024. — Vol. 16, no. 1. — Art. 78. — DOI: 10.3390/rs16010078.

9. Liang G., Cui X., Yuan D., Zhang L., Yang R. An Improved Point Cloud Filtering Algorithm Applies in Complex Urban Environments // Remote Sensing. — 2025. — Vol. 17, no. 8. — Art. 1452. — DOI: 10.3390/rs17081452.

10. Alsayed A., Nabawy M. R. A. Stockpile Volume Estimation in Open and Confined Environments: A Review // Drones. — 2023. — Vol. 7, no. 8. — Art. 537. — DOI: 10.3390/drones7080537.