

УДК 528.8:528.7:502.63:624.135

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕЛЬЕФА И ПРОФИЛЯ ТРАССЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Долгополов Даниил Валентинович¹,
d-daniil@yandex.ru

Аврунев Евгений Ильич²,
avrunev_ei@ngs.ru

Мелкий Вячеслав Анатольевич³,
vamelkiy@mail.ru

Веретельник Денис Анатольевич⁴,
VeretelnikDA@stargeo.pro

Жидиляева Елена Вячеславовна⁵,
zhidilyeva-ev@mail.ru

¹ Центр ГИС Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис», Россия, 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, 1.

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

³ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.

⁴ Общество с ограниченной ответственностью «СтарГео», Россия, 142784, г. Москва, г. Московский, ул. Московская, 3.

⁵ Кубанский государственный университет, Россия, 350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, 149.

Актуальность исследования обусловлена тем, что для обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводных сетей на территориях с активно протекающими природными процессами всегда необходимо организовывать мониторинг коридора трассы трубопровода. Комплексный анализ состояния трубопровода проводят по данным различных видов диагностики, геодезических и геологических изысканий, а также материалов, полученных с использованием аэро съемки, включая материалы воздушного лазерного сканирования. При этом крайне важной является информация о рельефе коридора трассы, геометрии трубопровода и динамике изменений состояния природно-технической среды в процессе эксплуатации трубопровода. Использование геоинформационной модели территории является эффективным инструментом для оценки состояния природно-технической системы трубопроводной сети, определения в пространстве положения дефектов трубопроводов, анализа причин их возникновения и выявления тенденций динамики процессов. Особенность такой модели – необходимость использования исходных данных из разных источников для ее создания. Это данные внутритрубной диагностики, материалы воздушного лазерного сканирования, аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов, материалы инженерно-геодезических изысканий. При этом исходные данные имеют разные характеристики, могут быть получены за разные периоды мониторинга, в разных системах координат и высот, могут иметь разную пространственную точность. Характеристики геоинформационной модели определяются в первую очередь характеристиками исходных данных, поэтому этот вопрос требует отдельного внимания.

Цель: проанализировать возможности использования исходных данных из различных источников – материалов аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов, воздушного лазерного сканирования, внутритрубной диагностики, измерений при инженерно-геодезических изысканиях – при работе с геоинформационной моделью.

Методы: дешифрирование аэроснимков, экспериментальные исследования в полевых условиях для определения точности данных беспилотных летательных аппаратов и воздушного лазерного сканирования, геоинформационные технологии.

Результаты. Приводится анализ пространственной точности исходных данных, используемых при моделировании рельефа и профиля трассы трубопровода. Работа с инструментами линейной системы координат позволяет использовать в качестве калибровочных точек объекты магистрального трубопровода, которые можно дешифрировать по материалам аэро съемки. Координаты и отметки высот объектов, используемых для калибровки, могут быть получены из эксплуатационной документации с привязкой к километру трассы или из материалов геодезической съемки. Применение инструментов линейной системы координат позволяет также наполнить модель данными о дефектах трубопровода, полученными в процессе внутритрубной диагностики, с точностью, достаточной для анализа причин их возникновения. При геотехническом мониторинге магистрального трубопровода основная роль отводится технологиям внутритрубной диагностики с целью определения дефектов трубопровода и дистанционного зондирования. Особое внимание уделяется контролю планово-высотного положения при формировании трехмерной цифровой модели местности по данным воздушного лазерного сканирования, который позволяет оценить влияние экзогенных геологических процессов на трубопровод. При формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта в процессе моделирования линейных и площадных объектов трубопровода

данные внутритрубной диагностики, а также глобальные данные о рельефе следует использовать с большой осторожностью, или использовать их после дополнительной проверки и корректировки.

Ключевые слова:

Природно-техническая среда трубопроводного транспорта, внутритрубная диагностика, аэрофотосъемка, воздушное лазерное сканирование, геоинформационная модель, трехмерная модель, пространственная точность, SRTM, ArcticDEM.

Введение

При строительстве и эксплуатации трубопроводных систем важнейшими задачами являются изучение природных условий и оценка влияния процессов, протекающих в геологической среде, на состояние трубопровода. Среди природных факторов, оказывающих наибольшее влияние на природно-техническую систему трубопроводного транспорта, отмечаются: геоморфология рельефа, проявления эндогенных и экзогенных геологических процессов (ЭГП), в том числе в специфических и многолетнемерзлых грунтах (ММГ) [1–11]. Решение оценочных задач влечет за собой повышение требований к геоинформационному обеспечению для работы с информацией, получаемой на предпроектной стадии, в рамках работ по технико-экономическому обоснованию проекта, на стадиях проектирования, строительства, а также в процессе выполнения комплекса работ по геотехническому мониторингу трубопровода [12–21].

Информация, получаемая при обследовании природно-технической системы трубопроводного транс-

порта, имеет пространственно-распределенный характер, при этом данные, получаемые в процессе геотехнического мониторинга, как правило, имеют разные характеристики (разную пространственную привязку, разные системы координат и высот, точности). Поэтому для корректного анализа дефектов и причин их возникновения требуется совместить результаты обследований природно-технической среды (наземные наблюдения, данные внутритрубной диагностики, материалы дистанционного зондирования Земли) в едином геоинформационном пространстве.

Увеличение объемов и видов диагностической информации о техническом состоянии трубопроводной системы, а также о состоянии природной среды и протекающих процессах приводит к необходимости создания геоинформационных моделей (ГИМ) объектов трубопроводного транспорта для совмещения в едином координатном пространстве материалов, полученных в процессе различных видов наблюдений и измерений и их комплексного изучения (рис. 1).

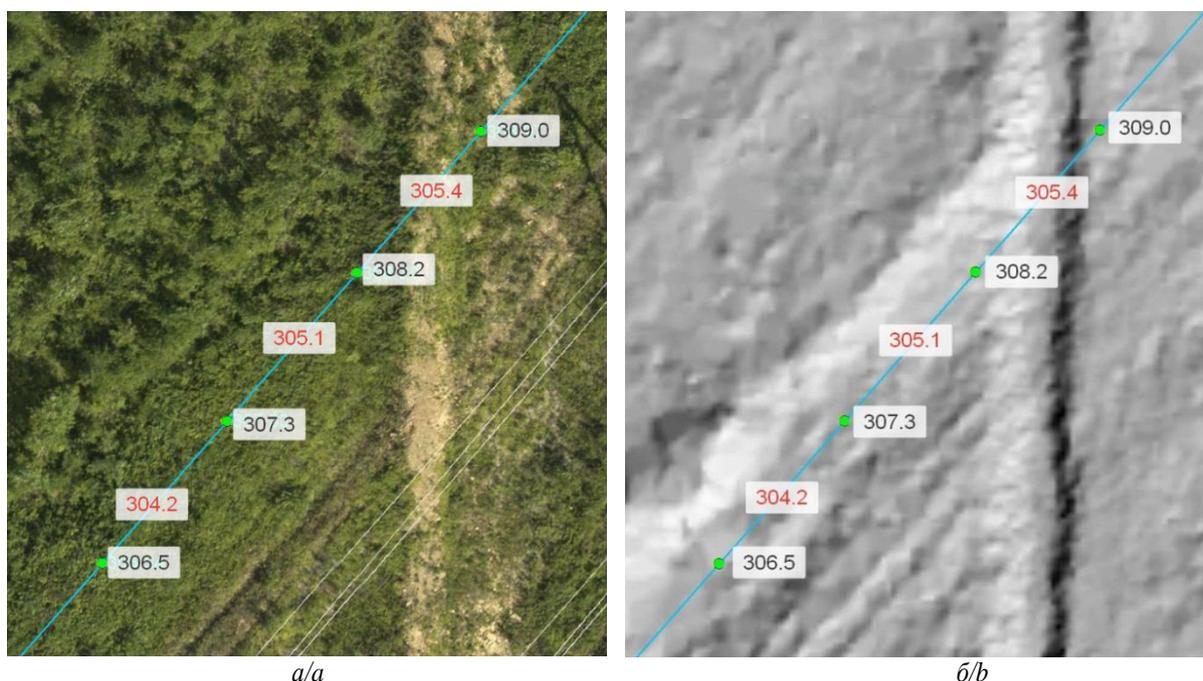


Рис. 1. Пример совмещения данных внутритрубной диагностики и воздушного лазерного сканирования в геоинформационной системе. Положение подземной части трубопровода нанесено по данным внутритрубной диагностики (красным цветом), отметки земли в коридоре трассы – по данным воздушного лазерного сканирования (черным цветом): а) на фоне аэрофотоизображения; б) на фоне отмывки рельефа, построенной по данным воздушного лазерного сканирования

Fig. 1. Example of combining in-line inspection and aerial laser scanning data in Geographic Information System. The position of the underground part of the pipeline is plotted by the data of in-line inspection (in red) and ground level in the corridor of the route – according to the airborne laser scanning (in black): a) against background of aerial image; b) against background of hill shading, built according to the aerial laser scanning data

Для работы с ГИМ целесообразно использовать геоинформационное обеспечение с возможностью трехмерной визуализации [22–26], позволяющее осуществлять комплексный анализ дефектов и причин их возникновения, а также с возможностью моделирования и визуализации развития опасных природных процессов во времени и прогнозирования их влияния на инфраструктуру трубопровода [27, 28].

В производственной деятельности в процессе эксплуатации для анализа состояния природно-технической среды, мониторинга протекающих процессов, анализа геометрии трубопровода часто используют актуальный (текущий) профиль рельефа трассы и профиль трубопровода, включающего помимо профиля рельефа положение трубопровода и характеристики отдельных элементов (секций трубопровода, объектов инфраструктуры, пересечений).

При построении профиля рельефа и профиля трассы трубопровода необходимо понимать и учитывать характеристики исходных данных (детальность, полноту, достоверность, актуальность, мерность, точность [13, 14, 29, 30]), чтобы, используя инструменты, верно оценить состояние природно-технической среды. Настоящая работа посвящена оценке точности исходных данных, используемых при моделировании рельефа и профиля трассы магистральных трубопроводов, для анализа их состояния.

Объектом настоящего исследования является профиль трассы магистрального трубопровода.

Предмет – точность исходных данных, используемых при моделировании рельефа и профиля трассы трубопроводов.

Материалы и методы исследования

Профиль рельефа и профиль трассы трубопровода являются составляющими геоинформационного пространства трубопроводного транспорта и характеризуются рядом геоинформационных свойств и параметров, которые в свою очередь определяются характеристикам исходной геопространственной информации (ГИ) (рис. 2).

Точность ГИ характеризуется средними или средними квадратическими погрешностями отображения пространственных, временных и других измеряемых свойств пространственных предметов [13, 14, 29, 30]. Вопросы точности пространственных данных периодически рассматриваются исследователями [31–37] при создании геоинформационных моделей объектов трубопроводного транспорта, при формировании профиля трассы или профиля рельефа, вопросы точности и возможности совместного использования данных из разных источников остаются крайне актуальными и требуют дополнительного рассмотрения.

В работе рассматриваются исходные данные для моделирования рельефа и профиля трассы на трех участках магистрального трубопровода: цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная по материалам воздушного лазерного сканирования (ВЛС) с пространственным разрешением до 20 см, ортофотоснимки с пространственным разрешением до 6 см, полученные при аэрофотосъемке (АФС), ЦМР по данным SRTM [38–45], ЦМР по данным ArcticDEM [46–51], результаты внутритрубой диагностики (ВТД), эксплуатационная документация (паспорт магистрального трубопровода).

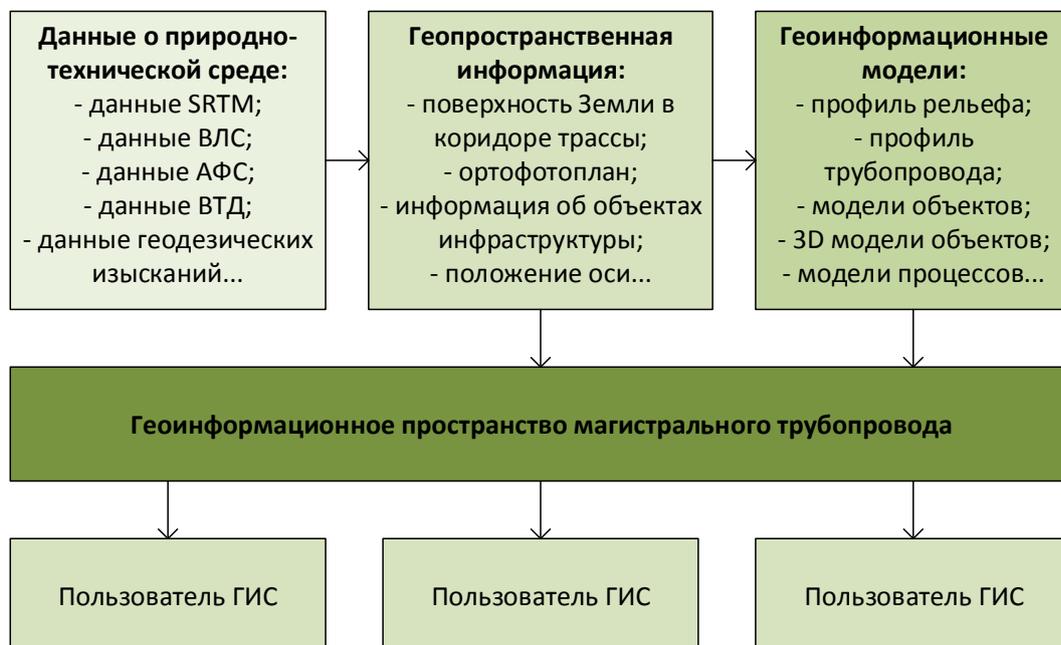


Рис. 2. Основные составляющие геоинформационного пространства магистрального трубопровода
Fig. 2. Main components of the Geoinformation space of main pipeline

В настоящем исследовании рассматриваются вопросы оценки точности исходных данных, доступных для построения профиля рельефа и профиля трассы, и

их пространственная точность по высоте. Оценка пространственной точности осуществлялась с применением данных воздушного лазерного сканирования

коридора трассы, на основании которых была получена цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 20 см и точностью по высоте 10 см.

Для обработки и анализа пространственных данных использовалось программное обеспечение ArcGIS (ESRI). Для привязки данных ВТД использовались инструменты ArcGIS Pipeline Referencing (ESRI).

Для построения профиля рельефа использовались:

- поверхность, построенная по данным SRTM (данные достаточные по точности для общего анализа местности на предпроектной стадии, а также при выполнении работ по технико-экономическому обоснованию проекта);
- поверхность, построенная по данным ArcticDEM (для полярных областей);
- поверхность, построенная по данным ВЛС (наиболее точные данные, в нашем исследовании являются эталоном);
- поверхность, построенная по данным АФС методом фотограмметрии;

- поверхность, построенная по горизонталям топографической карты;
- профиль, построенный по данным геодезических изысканий.

При построении профиля трассы трубопровода данные рельефа дополняют информацией о положении трубопровода и объектам инфраструктуры, а также о пересечениях с другими географическими объектами. Здесь в качестве основного источника данных выступают материалы внутритрубной диагностики, которые предоставляют нам данные по нижней отметке трубопровода (секции трубопровода). Высота поверхности земли (по данным ВТД) может быть получена путем сложения высотной отметки низа секции, диаметра трубопровода и глубины прокладки (заложения) трубопровода (рис. 3).

Диаметр и глубина прокладки (заложения) трубопровода были нами получены из паспорта трубопровода для каждого рассматриваемого участка.

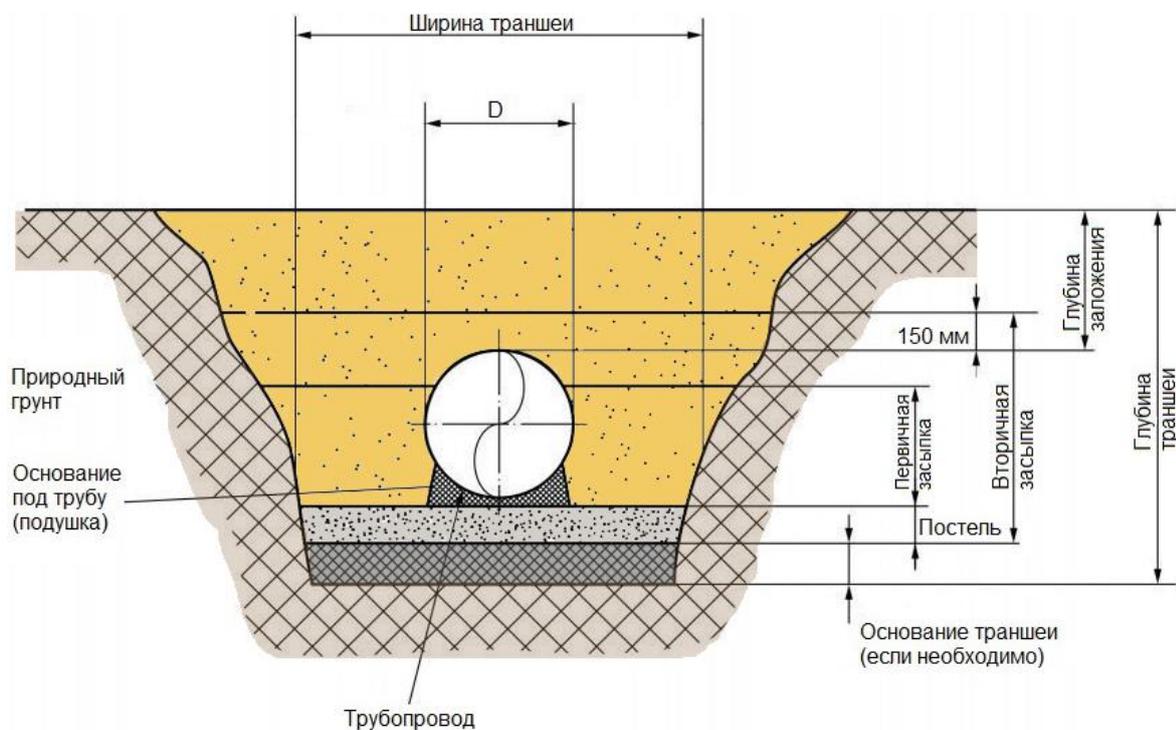


Рис. 3. Глубина заложения трубопровода на схеме

Fig. 3. Depth of pipeline in diagram

Результаты исследования

Оценка пространственной точности исходных данных была проведена нами на трех тестовых участках: рядом с камерой пуска (участок 1), на удалении более 50 км от камеры пуска (участок 2) и рядом с камерой приема снаряда внутритрубной диагностики (участок 3).

Тестовые участки расположены на юго-западе Якутии, на Сибирской платформе, рельеф плоскогорный. Участки имеют схожий рельеф и условия прокладки трубопровода, перепад высот на участках от 220 до 410 м над уровнем моря. Расстояние между

участками около 100 км, участки расположены на одной широте (60° с.ш.), трубопровод простирается с запада на восток.

Участок 1

На первом участке была проведена оценка пространственной точности профиля рельефа, построенного по данным ВТД.

Для того чтобы получить значение высоты поверхности земли к отметке низа секций, мы добавили диаметр магистрального трубопровода на этом участке и глубину заложения (рис. 3).

$$Z_{ПЗ} = Z_{НТ} + D_{МТ} + h_{ЗАЛ},$$

где $Z_{ПЗ}$ – отметка поверхности земли; $Z_{НТ}$ – отметка низа трубы; $D_{МТ}$ – диаметр магистрального трубопровода; $h_{ЗАЛ}$ – глубина заложения.

Также на первом участке были построены профили рельефа по глобальным данным о рельефе SRTM и ArcticDEM.

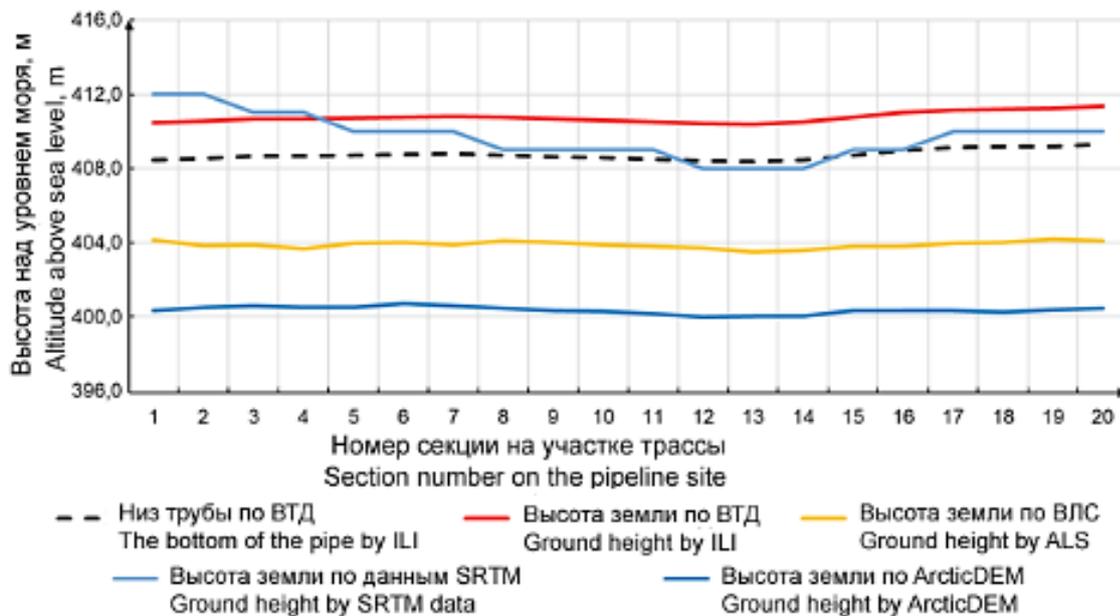


Рис. 4. Данные о положении трубы в соответствии с данными внутритрубной диагностики и земной поверхности в соответствии с ВТД, воздушным лазерным сканированием, SRTM и данными ArcticDEM на участке 1

Fig. 4. Data about position of the pipe according to in-line inspection (ILI) data and the earth's surface according to ILI, aerial laser scanning, SRTM and ArcticDEM data on site 1

Точность модели рельефа, созданной на основе данных ВТД, составила $\sigma=6,9$ м (табл. 1). Точность модели рельефа по данным SRTM $\sigma=5,9$ м и для ArcticDEM $\sigma=3,5$ м.

Таблица 1. Статистические данные моделей рельефа на участке 1

Статистические данные Statistical data	Источник данных о рельефе Source of relief data		
	ВТД ILI	SRTM M	ArcticDEM
Количество контрольных точек, шт. Number of control points, pcs.	20	20	20
Средняя разница высот Δh , м Average height difference Δh , m	6,9	5,8	3,5
Стандартное отклонение σ , м Standard deviation σ , m	6,9	5,9	3,5
Наибольшая разница высот Δh_{max} , м Greatest height difference is Δh_{max} , m	7,2	8,2	3,8

Анализ профиля, построенного по данным ВТД показал, что он в целом отражает изменения рельефа, но находится выше поверхности земли по данным ВЛС более чем на 6 м. Таким образом, мы видим существенное расхождение в данных, полученных в процессе ВЛС и ВТД.

Значения глобальных данных о рельефе (SRTM, ArcticDEM) оказались даже ближе к данным, полученным в процессе ВЛС, чем к данным ВТД. Проект SRTM предусматривает погрешность по высоте для

рельефа не менее 16 м [14]. Согласно данным наших исследований, приведенным в табл. 1, фактические значения оказались точнее (рис. 7).

Участок 2

На втором участке также была проведена оценка пространственной точности модели рельефа, построенной по данным ВТД, а также моделей рельефа по данным SRTM и ArcticDEM (рис. 5).

Особенностью второго участка является то, что он располагался на существенном расстоянии от камеры пуска/приема, на расстоянии около 100 км.

Точность модели рельефа по данным ВТД составила $\sigma=8,4$ м, по данным SRTM $\sigma=6,1$ м и ArcticDEM $\sigma=4,0$ м (табл. 2).

Таблица 2. Статистические данные моделей рельефа на участке 2

Статистические данные Statistical data	Источник данных о рельефе Source of relief data		
	ВТД ILI	SRTM TM	ArcticDEM
Количество контрольных точек, шт. Number of control points, pcs.	34	34	34
Средняя разница высот Δh , м Average height difference Δh , m	8,2	6,9	4,0
Стандартное отклонение σ , м Standard deviation σ , m	8,2	7,2	4,0
Наибольшая разница высот Δh_{max} , м Greatest height difference is Δh_{max} , m	10,4	10,2	4,8

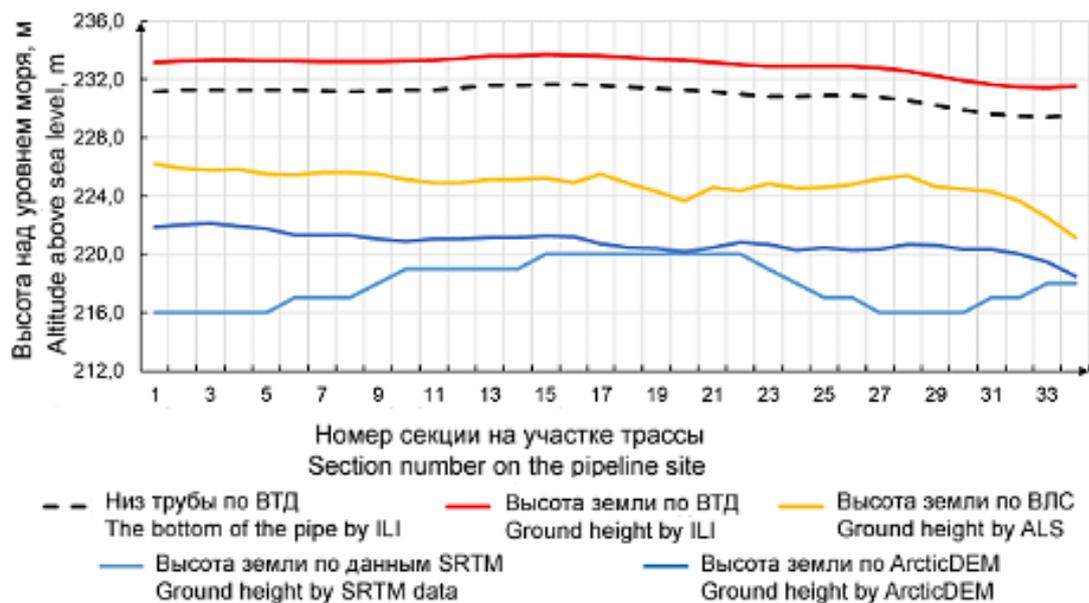


Рис. 5. Данные о положениях трубы и поверхности земли на участке 2

Fig. 5. Data about positions of pipe and ground surface on site 2

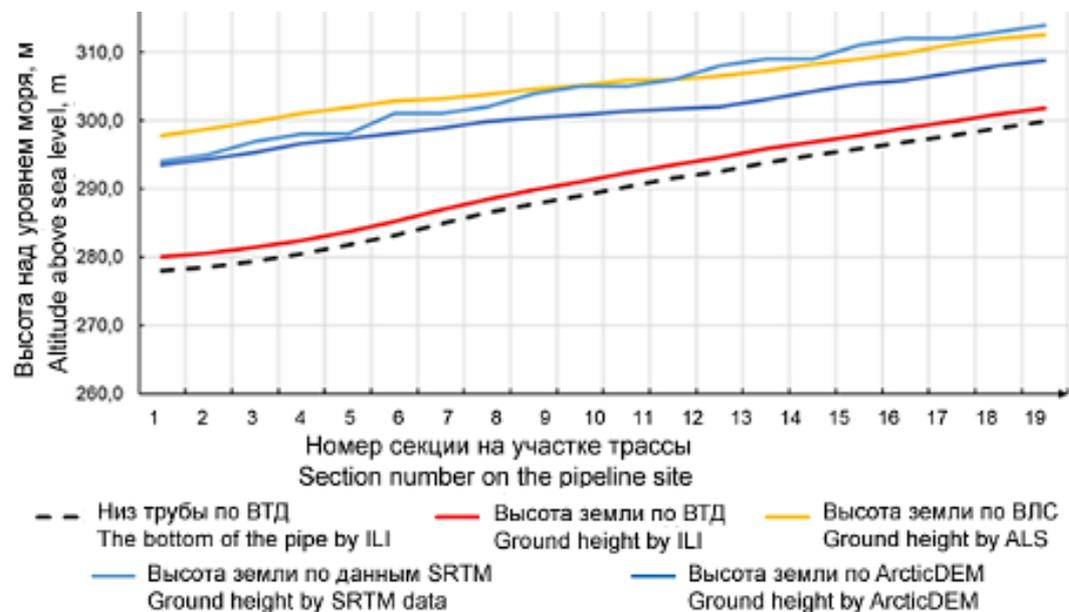


Рис. 6. Данные о положениях трубы и поверхности земли на участке 3

Fig. 6. Data about positions of pipe and ground surface on site 3

Таблица 3. Статистические данные моделей рельефа на участке 3

Table 3. Statistical data of relief models on site 3

Статистические данные Statistical data	Источник данных о рельефе Source of relief data		
	ВТД ILI	SR TM	Arctic DEM
Количество контрольных точек, шт. Number of control points, pcs.	20	20	20
Средняя разница высот Δh , м Average height difference Δh , m	14,3	1,8	4,2
Стандартное отклонение σ , м Standard deviation σ , m	14,6	2,1	4,2
Наибольшая разница высот Δh_{\max} , м Greatest height difference is Δh_{\max} , m	18,6	3,9	4,7

Участок 3

На третьем участке была проведена оценка пространственной точности модели рельефа, построенной по данным ВТД, а также моделей рельефа по данным SRTM и ArcticDEM. Результаты приведены в табл. 3 и на рис. 6.

Обсуждение

При создании геоинформационных моделей объектов трубопроводного транспорта, повышения их пространственной точности целесообразно использовать инструменты работы с линейными системами координат (ЛСК). Использование ЛСК позволяет применять в качестве калибровочных точек объекты

магистрального трубопровода, которые можно дешифровать по материалам аэросъемки. Это могут быть: задвижки, вантузы, камеры пуска и приёма средств очистки и диагностики и т. п., обнаружить которые можно с использованием методов визуального дешифрирования [1–3, 52–56]. Координаты и отметки высот объектов, используемых для калибровки, могут быть получены из эксплуатационной документации или материалов геодезической съемки (исполнительные съемки/мониторинг/инженерно-геодезические изыскания).

На участке 2 были проведены работы по корректировке значений, полученных средствами внутритрубой диагностики. Результаты приведены в табл. 4 и на рис. 7.

Анализ результатов корректировки данных классическими геодезическими методами показал улучшение точности профиля рельефа, построенного по данным ВТД.

Применение инструментов ЛСК позволяет также наполнить модель данными о дефектах трубопровода, полученными в процессе внутритрубой диагностики, с точностью, достаточной для анализа причин их возникновения.

Таблица 4. Статистические данные модели рельефа после корректировки

Table 4. Statistical data of the relief model after adjustment

Статистические данные Statistical data	Источник данных о рельефе Source of relief data	
	ВТД ILI	ВТД (корр.)/ILI (updating)
Количество контрольных точек, шт. Number of control points, pcs.	20	20
Средняя разница высот Δh , м Average height difference Δh , m	8,4	1,1
Стандартное отклонение σ , м Standard deviation σ , m	8,4	1,3
Наибольшая разница высот Δh_{\max} , м Greatest height difference is Δh_{\max} , m	10,4	3,0

Помимо этого, ЛСК позволяет дополнить модель информацией об объектах, описание положения которых приведено в эксплуатационной документации с привязкой к километру трассы, без указания географического положения или приведенного на схеме приблизительно.

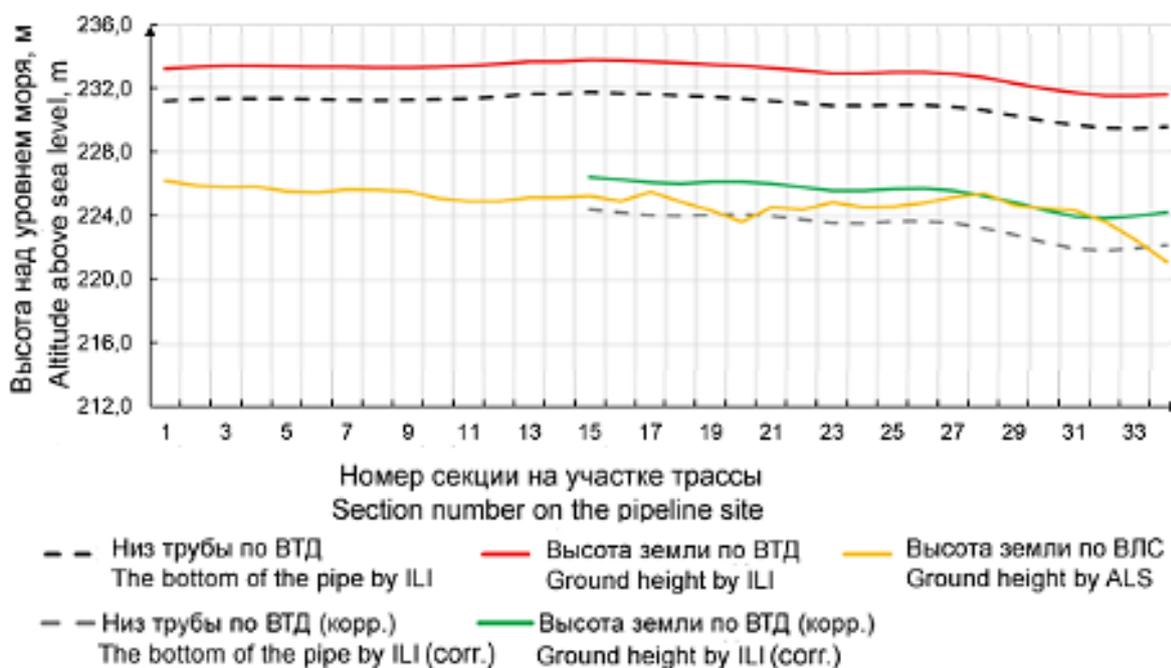


Рис. 7. Профили положения трубы по данным внутритрубой диагностики, поверхности земли по данным внутритрубой диагностики и воздушного лазерного сканирования, а также скорректированные значения положения трубы в процессе полевых геодезических изысканий на участке 2

Fig. 7. Sections of position of pipe according to in-line inspection data, ground surface according to in-line diagnostics and aerial laser scanning, as well as corrected values of pipe position during field geodetic surveys on site 2

Заключение

При формировании геоинформационного пространства трубопроводного транспорта в процессе моделирования линейных и площадных объектов трубопровода данные внутритрубой диагностики, а также глобальные данные о рельефе следует использовать с большой осторожностью, или использовать их после дополнительной проверки и корректировки.

При геотехническом мониторинге магистрального трубопровода основная роль отводится технологиям внутритрубой диагностики с целью определения дефектов трубопровода и дистанционного зондирования (для наблюдения за природными процессами в коридоре трассы). При комплексном анализе результатов геотехнического мониторинга требуется предварительно провести геодезический контроль результатов наблюдений.

Установлено, что при расположении трубопроводов в зонах со сложными природными условиями актуальной является задача анализа данных обследованных объектов трубопроводной сети, полученных за несколько циклов наблюдений, для контроля динамики протекания процессов и оценки эффективности компенсирующих мероприятий. При этом особое внимание уделяют влиянию ЭГП на трубопровод и

контролю планово-высотного положения элементов трубопровода, чтобы своевременно обнаружить опасные изменения в геометрии трубных секций. Для получения информации о планово-высотном положении объектов трубопровода при построении трехмерной цифровой модели местности целесообразно использовать методы воздушного лазерного сканирования, на которые следует опираться, в первую очередь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баборыкин М.Ю. Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. Дешифрирование материалов аэрокосмической съемки для анализа инженерно-геологических условий в общем алгоритме изысканий на линейных объектах // *Инженерные изыскания*. – 2014. – № 9–10. – С. 13–21.
2. Баборыкин М.Ю. Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. Выявление опасных геологических процессов при проведении инженерно-геологических изысканий на основе цифровых моделей рельефа // *Инженерные изыскания*. – 2015. – № 2. – С. 30–37.
3. Баборыкин М.Ю. Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. Факторы геологической опасности при проектировании и эксплуатации трубопроводов и их мониторинг // *Газовая промышленность*. – 2015. – № 11 (730). – С. 40–46.
4. Макаров В.И., Кюнтцель В.В., Авсюк Ю.Н. Энергетика экзогенных геологических процессов // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. – 1995. – № 2. – С. 3–26.
5. Сахаровский А.В., Строкова Л.А. Определение устойчивости оползневого склона при проектировании моста через р. Пошнарку в Чувашии // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 125–134. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2454>
6. Baker R. Non-Linear Strength Envelopes Based on Triaxial Test Data // *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*. – 2004. – V. 130. – P. 498–506. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:5\(498\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:5(498))
7. Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2019. – V. 78. – № 2. – P. 723–742. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1166-5>
8. Ingebritsen S.E., Sanford W.E., Neuzil C.E. *Groundwater in geologic processes*. 2nd ed. – New York: Cambridge Univ. Press, 2006. – 536 p.
9. Lee S., Thalib J.A. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis // *Environmental Geology*. – 2005. – V. 47. – P. 982–990. URL: <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1228-z> (дата обращения 19.11.2021).
10. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau / W.-Z. Guo, L. Luo, W.-L. Wang, Z.-Y. Liu, Z.-X. Chen, H.-L. Kang, B. Yang // *Geomorphology*. – 2019. – V. 337. – P. 69–78. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.04.006.
11. Troncone A. Numerical analysis of a landslide in soils with a strained softening behavior // *Geotechnique*. – 2005. – V. 55. – № 8. – P. 585–596.
12. Баборыкин М.Ю. Мониторинг опасных геологических процессов на линейных объектах // *Инженерные изыскания*. – 2013. – № 10–11. – С. 44–55.
13. Дешифрирование инфраструктуры магистральных трубопроводов по аэрокосмическим изображениям / Д.В. Долгополов, Д.В. Никонов, В.А. Мелкий, В.В. Братков // *Мониторинг. Наука и технологии*. – 2020. – № 2 (44). – С. 19–25. URL: <http://csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2020-2> (дата обращения 19.11.2021).
14. Долгополов Д.В., Баборыкин М.Ю., Мелкий В.А. Мониторинг опасных геологических процессов при строительстве и эксплуатации объектов трубопроводного транспорта по данным дистанционного зондирования Земли // *ИнтерэкспоГео-Сибирь*. – 2021. – Т. 4. – № 1. – С. 25–32. DOI: <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32>
15. Лисицкий Д.В. Перспективы развития картографии: от системы «Цифровая Земля» к системе виртуальной геореальности // *Вестник СГГА (Сибирской государственной геодезической академии)*. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 8–16.
16. Технологические решения в области обеспечения геопрограммной информации о магистральных трубопроводах и объектах их инфраструктуры / Е.И. Аврунев, Г.А. Уставич, А.О. Грекова, А.В. Никонов, В.А. Мелкий, Д.В. Долгополов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 188–201. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2729>
17. Active Optical Sensors (LASERS) / A. Abellán, M. Jaboyedoff, C. Michoud, M.H. Derron, T. Oppikofer // Deliverable 4.1 of the European project SafeLand: Review of Techniques for Landslide Detection, Fast Characterization, Rapid Mapping and Long-Term Monitoring / Ed. in 2010 by C. Michoud, A. Abellán, M.H. Derron, M. Jaboyedoff. – 2012. – P. 65–102. URL: <http://www.safeland-fp7.eu> (дата обращения 19.11.2021).
18. Bernhardsen T. *Geographic Information Systems: an introduction*. – New York: John Wiley & Sons, 2002. – 320 p.
19. Fukui H., Man D.C., Phan A. Digital earth: a platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables variables // *Big Earth Data*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1948677>
20. Guo H., Goodchild M.F., Annoni A. *Manual of digital Earth*. – Singapore: Springer, 2020. – 846 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9915-3>
21. Li Z. Pipeline spatial data modeling and pipeline WebGIS digital oil and gas pipeline: research and practice. – Springer Nature Switzerland AG. – 2020. – 154 p. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-030-24240-4.pdf> (дата обращения 19.11.2021).
22. Бугаков П.Ю. Принципы картографического отображения трехмерных моделей местности // *ИнтерэкспоГео-Сибирь*. – 2012. – Т. 3. – С. 156–161.
23. Долгополов Д.В. Геопрограммирование трубопроводного транспорта // *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. – 2021. – Т. 26. – № 1. – С. 76–85. DOI: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-1-76-85>
24. Лисицкий Д.В., Хорошилов В.С., Бугаков П.Ю. Картографическое отображение трехмерных моделей местности // *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2012. – № 2/1. – С. 98–102. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24356403_84912698.pdf (дата обращения 19.11.2021).
25. Glander T., Trapp M., Döllner J. Concepts for automatic generalization of virtual 3D landscape models // *Digital Landscape Architecture Proceedings*. – P. 127–135. URL: https://hpi.de/fileadmin/user_upload/fachgebiete/doellner/publications/2011/GTD11/2011_GlanderTrappDoellner_AutomaticGeneralization.pdf (дата обращения 19.11.2021).
26. Pasewaldt S., Trapp M., Döllner J. Multiscale visualization of 3D geovirtual environments using view-dependent multi-perspective views // *Journal of WSCG*. – 2011. – V. 19. – № 3. – P. 111–118. URL: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/1245/1/Pasewaldt.pdf> (дата обращения 19.11.2021).
27. Модель данных для расчета ореолов оттаивания с использованием программно-расчетного модуля / В.И. Суриков, Е.А. Покровская, Т.И. Кузнецов, Д.В. Долгополов, А.И. Барышев, Д.Ю. Федоренко, А.А. Захаров, С.Н. Чужин, П.А. Ревель-Муроз // *Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. пат. Россия, RU2017661876*, регистрац. 01.09.2017, публикац. 24.10.2017 URL:

- https://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2017661876&TypeFile=html (дата обращения 19.11.2021).
28. Модель данных для расчета планово-высотного положения с использованием программно-расчетного модуля / В.И. Суриков, Э.Р. Ибрагимов, Т.И. Кузнецов, Д.В. Долгополов, А.А. Захаров, С.Н. Чужинов, П.А. Ревель-Муроз, А.И. Барышев, Д.Ю. Федоренко // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. пат. Россия, RU2017662021, регистрац. 01.09.2017, публикац. 26.10.2017 URL: https://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2017662021&TypeFile=html (дата обращения 19.11.2021).
 29. Селезнев В.Е., Клишин Г.С., Кисилев В.В. Численное моделирование при анализе опасности аварий на газопроводах ТЭК // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 3. – С. 23–29.
 30. Карпик А.П. Методологические и технологические основы геоинформационного обеспечения территорий: монография. – Новосибирск: СГТА, 2004. – 260 с.
 31. Распутин А.Н. Геоинформационная система оценки влияния инженерно-геологических факторов на возникновение коррозионных дефектов газопроводов ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»: дис. ... канд. технических наук. – Екатеринбург, 2011. – 142 с.
 32. An assessment of the SRTM topographic products / E. Rodriguez, C.S. Morris, J.E. Belz, E. Chapin, J. Martin, W Daffer, S. Hensley // Technical Report JPL D-31639. – California, Pasadena, Jet Propulsion Laboratory. – 2005. – 143 p. URL: https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf (дата обращения 19.11.2021).
 33. Werner M. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Mission overview // Journal of RF-Engineering and Telecommunications. – 2001. – V. 55. – P. 75–79. DOI: <https://doi.org/10.1515/FREQ.2001.55.3-4.75>
 34. Орлянкин В.Н., Алешина А.Р. Использование матриц высот SRTM в предварительных расчетах и картографировании глубин потенциального паводкового затопления речных пойм // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 5. – С. 72–81. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019572-81>
 35. Коротин А.С., Попов Е.В. Оценка точности цифровых моделей рельефа, применяемых для территориальных исследований // Графикон'2015: Труды Юбилейной 25-й Международной научной конференции. – Протвино, 22–25 сентября 2015. – Протвино: Автономная некоммерческая организация «Институт физико-технической информатики», 2015. – С. 102–106.
 36. Оскорбин Н.М., Суханов С.И. Создание полигона для оценки точности имеющихся растровых карт и космических снимков высокого разрешения // Известия Алтайского государственного университета. – 2011. – № 1 (69). – Т. 1. – С. 108–112.
 37. Куметаитене А. Анализ точности первоначальных данных, используемых в моделировании рельефа // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2005. – Т. 1. – № 1. – С. 108–114.
 38. Farr T.G., Kobrick M. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data // Eos Transactions American Geophysical Union. – 2000. – V. 81. – P. 583–585. DOI: <https://doi.org/10.1029/E0081i048p00583>
 39. Им С.Т. Погрешности расчета углов и азимутальных направлений склонов по данным SRTM // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2010. – Т. 1. – № 4. – С. 164–167.
 40. Оньков И.В., Онянова Т.Я., Шилиева О.Ю. Исследование точности радарных ЦМР, построенных по снимкам ALOS PALSAR и модели SRTM, в зависимости от вида отражающей поверхности // Геоматика. – 2012. – № 4. – С. 33–36.
 41. Трофимов А.А., Филиппова А.В. Оценка точности матрицы высот SRTM по материалам топографических съемок // Геопрофи. – 2014. – № 6. – С. 13–17.
 42. Frey H., Paul F. On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2012. – V. 18. – P. 480–490. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.09.020>
 43. Shortridge A., Messina J. Spatial structure and landscape associations of SRTM error // Remote Sens. Environ. – 2011. – V. 115. – № 6. – P. 1576–1587. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.017>.
 44. USGS EROS Archive – Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) // U.S. Geological Survey. URL: www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_object (дата обращения 19.11.2021).
 45. SRTM Data. Download Manager. URL: <https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/> (дата обращения 19.11.2021).
 46. ArcticDEM. URL: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (дата обращения 19.11.2021).
 47. Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России / Е.В. Полякова, Ю.Г. Кутинов, А.Л. Минеев, З.Б. Чистова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 7. – С. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127>.
 48. Цифровые технологии дистанционного выявления и мониторинга развития бугров пучения и кратеров катастрофических выбросов газа в Арктике / В.И. Боговяленский, И.В. Боговяленский, Т.Н. Каргина, Р.А. Никонов // Арктика: экология и экономика. – 2020. – № 4 (40). – С. 90–105. DOI: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-90-105>.
 49. Никольский Д.Б. Современные тенденции в радиолокационном дистанционном зондировании Земли // Геоматика. – 2008. – № 1. – С. 7–10.
 50. Using ArcticDEM to analyse the dimensions and dynamics of debris-covered glaciers in Kamchatka, Russia / I.D. Barr, M.D. Dokukin, I. Kougkoulos, S.J. Livingstone, H. Lovell, J. Malecki, A.Y. Muraviev // Geosciences (Switzerland). – 2018. – V. 8. – № 6. – P. 216. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences8060216>
 51. Estimating river surface elevation from ArcticDEM / C. Dai, M. Durand, I.M. Howat, E.H. Altenau, T.M. Pavelsky // Geophysical Research Letters. 2018. – V. 45. – № 7. – P. 3107–3114. DOI: <https://doi.org/10.1002/2018GL077379>
 52. Возможности визуального дешифрирования магистральных трубопроводов и объектов инфраструктуры по спутниковым изображениям высокого и сверхвысокого пространственного разрешения / Д.В. Долгополов, Д.В. Никонов, А.В. Полуянова, В.А. Мелкий // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2019. – Т. 24. – № 3. – С. 65–81. DOI: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81>
 53. Оценка точности 3D-моделей, построенных с использованием беспилотных авиационных систем / Е.И. Аврунев, Х.К. Ямбаев, О.А. Опритова, А.В. Чернов, Д.В. Гоголев // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). – 2018. – Т. 23. – № 3. – С. 211–228.
 54. Разработка методик автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков. Дешифровочные признаки изображений объектов на многоспектральных космических снимках / А.П. Гук, Л.Г. Евстратова, Е.П. Хлебникова, М.А. Алтынцев, С.А. Арбузов, А.С. Гордиенко, А.А. Гук, Д.П. Симонов // Геодезия и картография. – 2013. – № 7. – С. 31–40.
 55. Хренов Н.Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Аэрокосмические методы и обработка материалов съемок. – М.: Газойл пресс, 2003. – 352 с.
 56. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 6. – С. 3–17.

Поступила 01.04.2022 г.

Информация об авторах

Долгополов Д.В., кандидат технических наук, руководитель направления Центра ГИС Автономной некоммерческой организации высшего образования «Университет Иннополис».

Аврунев Е.И., кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

Мелкий В.А., доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Веретельник Д.А., исполнительный директор Общества с ограниченной ответственностью «СтарГео».

Жидиляева Е.В., старший преподаватель кафедры нефтяной геологии, гидрогеологии и геотехники Института географии, геологии, туризма и сервиса Кубанского государственного университета.

UDC 528.8:528.7:502.63:624.135

ANALYSIS OF ACCURACY OF INITIAL DATA USED IN MODELING RELIEF AND PROFILE OF THE MAIN PIPELINES ROUTE

Daniil V. Dolgopolov¹,
d-daniil@yandex.ru

Evgeny I. Avrunev²,
avrynev_ei@ngs.ru

Vyacheslav A. Melkiy³,
vamelkiy@mail.ru

Denis A. Veretelnik⁴,
VeretelnikDA@stargeo.pro

Elena V. Zhidilyaeva⁵,
zhidilyeva-ev@mail.ru

¹ Autonomous Non-profit Organization of Higher Education «Innopolis University»,
1, Universitetskaya street, Innopolis, 420500, Russia.

² Siberian State University of Geosystems and Technologies,
10, Plakhotny street, Novosibirsk, 630108, Russia.

³ Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science,
1B, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia.

⁴ Limited Liability Company «StarGeo»,
3, Moskovskaya street, Moskovsky city, Moscow, 142784, Russia.

⁵ Kuban State University,
149, Stavropolskaya street, Krasnodar, 350040, Russia.

The relevance of the research is caused by fact that in order to ensure the safe operation of pipeline networks in areas with active natural processes, it is always necessary to organize monitoring of the pipeline route corridor. Comprehensive analysis of the condition of the pipeline is carried out according to various types of diagnostics, geodetic and geological surveys, as well as materials obtained using aerial photography, including aerial laser scanning materials. At the same time, information about relief in the route corridor, geometry of pipeline and dynamics of changes in state of natural and technical environment during operation of the pipeline is extremely important. The use of geographic information model of territory is effective tool for assessing state of natural and technical system of pipeline network, determining position of pipeline defects in space, analyzing the causes of their occurrence and identify trends in dynamics of natural processes. The peculiarity of such model need to use source data from different sources for create it. These are the data of in-line inspection, materials of aerial laser scanning, aerial photography using unmanned aerial vehicles, materials of engineering and geodetic surveys. Initial data have different characteristics, can be obtained on different monitoring phase, in different coordinate systems and heights, and may have different spatial accuracy at same time. The characteristics of geographic information model are determined primarily by accuracy of source data, so this issue requires special attention.

The purpose of the research was to analyze the possibilities of using initial data from various sources when creating geoinformation models: aerial photography materials using unmanned aerial vehicles, aerial laser scanning, integrated diagnostics, measurements during engineering and geodetic surveys.

Methods: decoding of aerial photographs, experimental research of accuracy of unmanned aerial vehicles and aerial laser scanning data, geoinformation technologies.

Results. The article provides an analysis of the spatial accuracy of the initial data used in modeling the relief and profile of the pipeline route. Working with the tools of the linear coordinate system allows you to use as calibration points, objects of the main pipeline, which can be discerned from aerial survey materials. Coordinates and elevation marks of objects used for calibration can be obtained from operational documentation with reference to the kilometer of the route or geodetic survey materials. The use of linear coordinate system tools also makes it possible to fill the model with data on pipeline defects obtained in the in-line inspections, with accuracy sufficient to analyze the causes of their occurrence. In geotechnical monitoring of main pipeline, main role assigned to the technologies of the in-line inspection in order to determine pipeline defects and remote sensing. Special attention is paid to the control of the planned altitude position during the formation of a three-dimensional digital terrain model based on aerial laser scanning data, which allows us to assess the impact of exogenous geological processes on the pipeline. Smart pigging data, as well as global terrain data, should be used with great care, when forming the geoinformation space of pipeline transport in the process of modeling linear and areal pipeline objects, or they should be used after additional verification and correction.

Key words:

Natural and technical environment of pipeline transport, in-line diagnostics, aerial surveys, aerial laser scanning, in-line diagnostics, aerial laser scanning, geoinformation model, three-dimensional model, spatial accuracy, SRTM, ArcticDEM.

REFERENCES

- Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V., Pogosyan A.G. Interpretation of aerospace materials to determine engineering-geological conditions in the general algorithm of surveys at linear objects. *Engineering survey*, 2014, no. 9–10, pp. 13–21. In Rus.
- Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V., Pogosyan A.G. Revealing hazardous geological processes for engineering-geological surveys on the basis of digital terrain models. *Engineering survey*, 2015, no. 2, pp. 30–36. In Rus.
- Baborykin M.Yu., Zhidilyaeva E.V., Pogosyan A.G. Factors of geological hazard in the design and operation of pipelines and their monitoring. *GAS Industry of Russia*, 2015, no. 11 (730), pp. 40–46. In Rus.
- Makarov V.I., Kyunttsel V.V., Avsyuk Yu.N. Energetics of exogenous geological processes. *Geoekologiya. inzheneraya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 1995, no. 2, pp. 3–26. In Rus.
- Sakharovskiy A.V., Strokova L.A. Determining landslide slope stability when designing a bridge over the river Poshnarka in the Chuvash republic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 125–134. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/1/2454>
- Baker, R. Non-Linear Strength Envelopes Based on Triaxial Test Data. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2004, vol. 130, pp. 498–506. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:5\(498\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:5(498))
- Hearn G.J. Geomorphology in engineering geological mapping and modelling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, vol. 78, no. 2, pp. 723–742. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1166-5>
- Ingebritsen S.E., Sanford W.E., Neuzil C.E. *Groundwater in geologic processes*. 2nd ed. New York, Cambridge Univ. Press, 2006. 536 p.
- Lee S., Thalib J.A. Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 2005, vol. 47, pp. 982–990. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1228-z>
- Guo W.-Z., Luo L., Wang W.-L., Liu Z.-Y., Chen Z.-X., Kang H.-L., Yang B. Sensitivity of rainstorm-triggered shallow mass movements on gully slopes to topographical factors on the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 2019, vol. 337, pp. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.006>
- Troncone A. Numerical analysis of a landslide in soils with a strained softening behavior. *Geotechnique*, 2005, vol. 55, no. 8, pp. 585–596. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2005.55.8.585>
- Baborykin M.Yu. Monitoring of hazardous geological processes at linear objects. *Engineering survey*, 2013, no. 10–11, pp. 44–55. In Rus.
- Dolgoplov D.V., Nikonov D.V., Melkiy V.A., Bratkov V.V. Interpretation of trunk pipeline infrastructure by aerospace images. *Monitoring. Science & Technologies*, 2020, no. 2 (44), pp. 19–25. In Rus. Available at: <http://csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2020-2> (accessed 19 November 2021).
- Dolgoplov D.V., Baborykin M.Yu., Melkiy V.A. Monitoring of hazardous geological processes in the construction and operation of pipeline transport facilities by remote sensing data. *Interexpo Geo-Siberia*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 25–32. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-4-1-25-32>
- Lisitsky D.V. Prospects for cartography development: from digital land to virtual georeality. *Bulletin of the SGGG (Siberian State Geodetic Academy)*, 2013, no. 2 (22), pp. 8–16. In Rus.
- Avrunev E.I., Ustavich G.A., Grekova A.O., Nikonov A.V., Melkiy V.A., Dolgoplov D.V. Technological solutions in sphere of geospatial information on long distance pipelines and objects of their infrastructure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 188–201. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/7/2729>
- Abellán A., Jaboyedoff M., Michoud C., Derron M.H., Oppikofer T. Active Optical Sensors (LASERS). *Deliverable 4.1 of the European project SafeLand: Review of Techniques for Landslide Detection, Fast Characterization, Rapid Mapping and Long-Term Monitoring*. Ed. in 2010 by C. Michoud, A. Abellán, M.H. Derron, M. Jaboyedoff. 2012, pp. 65–102. Available at: <http://www.safeland-fp7.eu> (accessed 19 November 2021).
- Bernhardsen T. *Geographic Information Systems: an introduction*. New York, John Wiley & Sons, 2002. 320 p.
- Fukui H., Man D.C., Phan A. Digital earth: a platform for the SDGs and green transformation at the global and local level, employing essential SDGs variables. *Big Earth Data*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/20964471.2021.1948677>
- Guo H., Goodchild M.F., Annoni A. *Manual of Digital Earth*. Singapore, Springer, 2020. 846 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9915-3>
- Li Z. *Pipeline Spatial Data Modeling and Pipeline WebGIS. Digital Oil and Gas Pipeline: Research and Practice*. Springer Nature Switzerland AG, 2020, 154 p. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-030-24240-4.pdf> (accessed 19 November 2021).
- Bugakov P.Yu. Principles of cartographic mapping of three-dimensional terrain models. *Interexpo Geosibir*, 2012, vol. 3, pp. 156–161. In Rus.
- Dolgoplov D.V. Pipeline transport geospaces. *Bulletin of SGUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2021, vol. 26, no. 1, pp. 76–85. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2021-26-1-76-85>
- Lisitsky D.V., Khoroshilov V.S., Bugakov P.Yu. Cartographic representation of 3D terrain models. *Izvestia vuzov. Geodesy and aerophotosurveying*, 2012, no. 2/1, pp. 98–102. In Rus. Available at: URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24356403_84912698.pdf (accessed 19 November 2021).
- Glander T., Trapp M., Döllner J. Concepts for automatic generalization of virtual 3D landscape models. *Digital Landscape Architecture Proceedings*. pp. 127–135. Available at: https://hpi.de/fileadmin/user_upload/fachgebiete/doellner/publications/2011/GTD11/2011_GlanderTrappDoellner_AutomaticGeneralization.pdf (accessed 19 November 2021).
- Pasewaldt S., Trapp M., Döllner J. Multiscale visualization of 3D geovirtual environments using view-dependent multi-perspective views. *Digital Landscape Architecture Proceedings*, 2011, pp. 127–135. Available at: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/1245/1/Pasewaldt.pdf> (accessed 19 November 2021).
- Surikov V.I., Pokrovskaya E.A., Kuznetsov T.I., Dolgoplov D.V., Baryshev A.I., Fedorenko D.Yu., Zakharov A.A., Chuzhinov S.N., Revel-Muroz P.A. *Model dannyykh dlya rascheta osetov ot taivaniya s ispolzovaniem programmno-raschetnogo modulya* [Data model for calculating thawing halos using a software calculation module]. Certificate of registration of a computer program. Patent RF, RU2017661876, 2017. Available at: https://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2017661876&TypeFile=html (accessed 19 November 2021).
- Surikov V.I., Ibragimov E.R., Kuznetsov T.I., Dolgoplov D.V., Zakharov A.A., Chuzhinov S.N., Revel-Muroz P.A., Baryshev A.I., Fedorenko D.Y. *Model dannyykh dlya rascheta planovyo-vysotnogo polozheniya s ispolzovaniem programmno-raschetnogo modulya* [Data model for calculating the planned altitude position using a software calculation module]. Certificate of registration of a computer program. Patent RF, RU2017662021, 2017. Available at: https://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2017662021&TypeFile=html (accessed 19 November 2021).
- Seleznev V.E., Klishin G.S., Kisilev V.V. Chislennoe modelirovanie pri analize opasnosti avariy na gazoprovodakh TEK [Numerical modeling in the analysis of the hazard of accidents on fuel and energy pipelines]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2002, no. 3, pp. 23–29.
- Karpik A.P. *Metodologicheskie i tekhnologicheskie osnovy geoinformatsionnogo obespecheniya territoriy: monografiya* [Methodological and technological foundations of geoinformation support of territories: monograph]. Novosibirsk, SGGG Publ., 2004. 260 p.
- Rasputin A.N. *Geoinformatsionnaya sistema otsenki vliyaniya inzhenerno-geologicheskikh faktorov na vozniknovenie korroziyonnykh defektov gazoprovodov OOO «Gazprom transgaz Ekaterinburg»*. Dis. Kand. nauk [Geoinformation system for assessing the influence of engineering and geological factors on the occurrence of corrosion defects of gas pipelines of «Gazprom Transgaz Yekaterinburg» LLC. Cand. Dis.]. Ekaterinburg, 2011. 142 p.
- Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E., Martin J., Daffer W., Hensley S. *An assessment of the SRTM topographic products. Technical Report JPL D-31639*. California, Pasadena, Jet Propulsion Laboratory, 2005. 143 p. Available at: https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf (accessed 19 November 2021).

33. Werner M. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Mission overview. *Journal of RF-Engineering and Telecommunications*, 2001, vol. 55, pp. 75–79. DOI: <https://doi.org/10.1515/FREQ.2001.55.3-4.75>
34. Orlyankin V.N., Alyoshina A.R. The use of matrixes of heights srtm in the preliminary calculations and mapping of depths and potential flood inundation of fluvial plain. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, no. 5, pp. 72–81. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019572-81>.
35. Korotin A.S. Popov E.V. Otsenka tochnosti tsifrovyykh modeley relefa, primenyayemykh dlya territorialnykh issledovaniy [Assessment of the accuracy of digital terrain models used for territorial research]. *Grafikon'2015: Trudy Yubileynoy 25-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Graphon'2015. Proc. of the 25th Anniversary International Scientific Conference]. Protvino, September 22–25, 2015. Protvino, Institute of Physical and Technical Informatics, 2015. pp. 102–106.
36. Oskorbin N.M., Sukhanov S.I. Creation of a polygon to assess the accuracy of existing raster maps and high-resolution satellite images. *Izvestiya of Altai State University*, 2011, vol. 1 (69), no. 1, pp. 108–112. In Rus. Available at: <http://izvestia.asu.ru/2011/1-1/info-comp/TheNewsOfASU-2011-1-1-info-comp-14.pdf> (accessed 19 November 2021).
37. Kumetaiteina A. Analiz tochnosti pervonachalnykh dannykh, ispolzuemykh v modelirovaniy relefa [Analysis of the accuracy of the initial data used in terrain modeling]. *Interksp Geo-Sibir*, 2005, vol. 1, no. 1, pp. 108–114.
38. Farr T.G., Kobrick M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 2000, vol. 81, pp. 583–585. DOI: <https://doi.org/10.1029/EO081i048p00583>
39. Im S.T. Pogreshnosti rascheta uglov i azimutalnykh napravleniy sklonov po dannym SRTM [Errors in calculating angles and azimuthal directions of slopes according to SRTM data]. *Interksp Geo-Sibir*, 2010, vol. 1, no. 4, pp. 164–167.
40. Onkov I.V., Onyanova T.Ya., Shilyaeva O.Yu. Issledovanie tochnosti radarnykh TSMR, postroennykh po snimkam ALOS PALSAR i modeli SRTM, v zavisimosti ot vida otrazhayushchey poverkhnosti [Investigation of the accuracy of radar DEMs built from ALOS PALSAR images and SRTM model, depending on the type of reflecting surface]. *Geomatika*, 2012, no. 4, pp. 33–36.
41. Trofimov A.A., Filippova A.V. Otsenka tochnosti matritsy vysot SRTM po materialam topograficheskikh semok [Estimation of the accuracy of the height matrix SRTM on the materials of topographic surveys]. *Geoprofi*, 2014, no. 6, pp. 13–17.
42. Frey H., Paul F. On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2012, vol. 18, pp. 480–490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.09.020>.
43. Shortridge A., Messina J. Spatial structure and landscape associations of SRTM error. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115, no. 6, pp. 1576–1587. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.017>.
44. USGS EROS Archive – Digital Elevation – Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). *U.S. Geological Survey*. Available at: www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_object (accessed 19 November 2021).
45. 21 SRTM Data. *Download Manager*. Available at: <https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/> (accessed 19 November 2021).
46. 22ArcticDEM. Available at: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/> (accessed 19 November 2021).
47. Polyakova E.V., Kutinov Yu.G., Mineev A.L., Chistova Z.B. Analysis of the applicability of the ASTER GDEM v2 and ArcticDEM digital elevation models in research on Russia's Arctic territories. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 7, pp. 117–127. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127>.
48. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N., Nikonov R.A. Digital technologies for remote detection and monitoring of the development of heaving mounds and craters of catastrophic gas blowouts in the Arctic. *Arctic: ecology and economy*, 2020, no. 4 (40), pp. 90–105. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-4-90-105>
49. Nikolskiy D.B. Sovremennye tendentsii v radiolokatsionnom distantsionnom zondirovaniy Zemli [Current trends in radar remote sensing of the Earth]. *Geomatika*, 2008, no. 1, pp. 7–10.
50. Barr I.D., Dokukin M.D., Koukoulos I., Livingstone S.J., Lovell H., Malecki J., Muraviev A.Y. Using ArcticDEM to analyse the dimensions and dynamics of debris-covered glaciers in Kamchatka, Russia. *Geosciences (Switzerland)*, 2018, vol. 8, no. 6, pp. 216. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences8060216>.
51. Dai C., Durand M., Howat I.M., Altenau E.H., Pavelsky T.M. Estimating river surface elevation from ArcticDEM. *Geophysical Research Letters*, 2018, vol. 45, no. 7, pp. 3107–3114. DOI: <https://doi.org/10.1002/2018GL077379>
52. Dolgoplov D.V., Nikonov D.V., Poluyanova A.V., Melkiy V.A. Possibilities of visual decoding of trunk pipelines and infrastructure facilities using satellite images of high and ultra-high spatial resolution. *Bulletin of the SSUGIT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 65–81. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2019-24-3-65-81>
53. Avrunev E.I., Yambaev H.K., Opritova O.A., Chernov A.V., Gogolev D.V. Evaluation of the accuracy of 3D models constructed using unmanned aircraft systems. *Bulletin of the SSUGIT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*, 2018, vol. 23, no. 3, pp. 211–228. In Rus.
54. Guk A.P., Evstratova L.G., Khlebnikova E.P., Altyntsev M.A., Arbuzov S.A., Gordienko A.S., Guk A.A., Simonov D.P. Development of techniques for automated decoding of aerospace images. Object picture interpretive features on multispectral satellite images. *Geodesy and Cartography*, 2013, no. 7, pp. 31–40. In Rus.
55. Khrenov N.N. *Osnovy kompleksnoy diagnostiki severnykh truboprovodov. Aerokosmicheskie metody i obrabotka materialov semok* [Fundamentals of complex diagnostics of northern pipelines]. Moscow, Gazoyl Press, 2003. 352 p.
56. Bondur V.G. Aerospace methods and technologies for monitoring of oil and gas areas and facilities. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2010, no. 6, pp. 3–17. In Rus.

Received: 1 April 2022.

Information about the authors

Daniil V. Dolgoplov, Cand. Sc., head direction of GIS Center, Autonomous Non-profit Organization of Higher Education «Innopolis University».

Evgeny I. Avrunev, Cand. Sc., associate professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

Vyacheslav A. Melkiy, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far East Branch of Russian Academy of Science.

Denis A. Veretelnik, executive director, Limited Liability Company «Stargeo».

Elena V. Zhidilyaeva, senior lecturer, Institute of Geography, Geology, Tourism and Service of Kuban State University.