

УДК 528.242: 528.91

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-3-14-25

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ КВАЗИГЕОИДА НА ЛОКАЛЬНОМ УЧАСТКЕ СРЕДСТВАМИ ГИС

Ирина Геннадьевна Ганагина

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой космической и физической геодезии, e-mail: gam0209@yandex.ru

Дарья Сергеевна Челнокова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, магистрант, тел. (905)956-44-74, e-mail: sergeevna0403@gmail.com

Денис Николаевич Голдобин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, инженер кафедры космической и физической геодезии, e-mail: phis.geo.sgga@gmail.com

Возможности полнофункциональных геоинформационных систем, применяемых в различных областях, позволяют моделировать характеристики гравитационного поля, представляя измерительную информацию в виде непрерывных поверхностей, тем самым расширяя область использования данных о гравитационном поле Земли. Важным этапом визуализации является выбор метода интерполирования данных, обеспечивающих максимально высокую точность создания цифровой модели исследуемой характеристики гравитационного поля. Авторами разработана технология выбора оптимального метода интерполирования характеристик гравитационного поля Земли в среде ГИС для создания моделей с оценкой их точности по исходным данным, представленная в виде технологической схемы. Рассмотрены возможности программного продукта Golden Software Surfer для создания модели высот квазигеоида по неравномерно представленным данным спутникового и геометрического нивелирования на исследуемой территории. Предложен метод интерполяции высот квазигеоида в Golden Software Surfer, создана модель квазигеоида на локальном участке. Выполнена оценка точности созданной модели по исходным данным.

Ключевые слова: аппроксимация исходных данных, геоинформационные системы, геопространственное моделирование, методы интерполирования, характеристики гравитационного поля Земли, высота квазигеоида.

Введение. Анализ вопроса

Важными факторами, определяющими формирование информационного пространства с учетом потребностей в получении качественных и достоверных данных, создание и применение отечественных цифровых платформ и технологий, обеспечение их конкурентоспособности на международном уровне, являются технологии координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО), включающие в себя получение данных об объекте с высокой точностью и дающие возможность их анализа и интерпретации.

Координатное обеспечение любого объекта поддерживается благодаря активному

использованию ГНСС-технологий. Для получения высокоточной гравитационной составляющей КВНО на современном этапе необходимо решить ряд проблем, связанных с наземными определениями и созданием моделей характеристик гравитационного поля планетарного, регионального и локального характера с высокой точностью. Проблемы высокоточного определения основных характеристик гравитационного поля, к которым относятся аномалии силы тяжести, высоты квазигеоида и отклонения отвесной линии, достаточно полно освещены в многочисленных публикациях [1–5].

Особое место занимает проблема представления характеристик гравитационного по-

ля, получения достоверных картографических произведений для целей не только визуализации, но и качественного анализа, интерпретации данных и их дальнейшего использования при решении задач геодезии, геофизики, геодинамики и смежных наук.

Развитие цифровых технологий в сфере картографирования позволили хранить, обрабатывать и анализировать большой объем модельных и измерительных данных, применяя геоинформационные системы (ГИС) [6]. В настоящее время для представления информации о гравитационном поле и его характеристиках глобального и локального характера используют различные полнофункциональные ГИС.

Проблематика, принципы и методы геоинформационного моделирования характеристик гравитационного поля как для целей визуализации, так и для анализа полученной картографической информации представлены в различных публикациях [7–13], авторы которых приводят результаты моделирования аномалий силы тяжести, высот квазигеоида средствами ГИС. Анализ публикаций [14–18] позволил выделить активно применяемые программные продукты и круг решаемых задач в рамках исследования гравитационного поля.

Специализированная программа Golden Software Surfer используется для моделирования, анализа и визуализации поверхностей, построения различных карт как двумерного, так и трехмерного изображения. С помощью программного пакета Surfer создаются карты высот квазигеоида, аномалий силы тяжести, абсолютных значений силы тяжести непосредственно по наблюдениям, абсолютных значений напряженности силы тяжести, модуля полного горизонтального градиента силы тяжести, выполняется анализ структуры поля [19–22].

Для решения задач визуализации гравитационного поля и его характеристик активно используются программные продукты корпорации ERSI. Комплексное применение программных продуктов ERSI: ArcGIS, ArcMap, ArcScene, ArcGlobe и ArcCatalog – позволяет создавать картографические материалы по гравиметрическим и геофизическим

данным на основе широкого спектра возможностей базовой комплектации программы и наличия дополнительных модулей для визуализации, в которых представлены различные методы интерполяции [16, 23–25]. Особое значение имеют возможности программного продукта, которые позволяют исключить ошибки оператора и сократить время выполнения обработки пространственных данных [13, 18, 26].

Широкое внедрение в производство работ по изучению характеристик гравитационного поля Земли (ГПЗ) программного комплекса ArcGIS базируется на возможности использования его в качестве платформы для создания новых приложений и модификации стандартных, решающих определенные профессиональные задачи: упрощение процедуры обработки и хранения гравиметрических данных с возможностью восстановления [27, 28], вычисление трансформант геопотенциальных полей в произвольно выбранных точках пространства [21], отображение пространственных векторных полей на плоскости установленной палитрой цветов и восстановление положения векторов в пространстве по созданному цветному изображению [15, 29].

Отдельное место при геоинформационном картографировании гравиметрических данных занимают программные продукты, разработанные для решения специализированных задач геологии, геофизики и гравитационной разведки полезных ископаемых. Исследовательские институты, производственные объединения создают программные комплексы, позволяющие получать карты характеристик ГПЗ с помощью широкого набора инструментов и методов с возможностью визуализации данных в трехмерном пространстве [17, 30–33] и проводить интегрированный анализ разнородных и разноуровневых данных [34–38].

В последнее время для решения широкого спектра задач геоинформационного картографирования применяются программные продукты с открытым исходным кодом, который позволяет пользователям самостоятельно создавать и интегрировать необходимые модули и тем самым динамично развивать геоинформационные технологии [10, 39].

На рис. 1 представлен перечень задач, для решения которых в настоящее время применяются средства и методы геоинформационного картографирования характеристик гравитационного поля Земли.

Анализ геоинформационного картографирования гравиметрических данных показал широкое применение созданных материалов для решения научных и прикладных задач средствами ГИС.

Создание цифровой информации о гравитационном поле Земли и его характеристиках, ее картографическое представление является одной из актуальных задач геодезии, геофизики и ряда других наук о Земле. Исследования в этой области имеют не только научный, но и производственный интерес. Работы, отражающие создание картографического изображения гравитационного поля Земли и его характеристик в среде ГИС, очень разнообразны по используемым про-

граммным продуктам, решаемым задачам и территориальному охвату.

Анализ публикаций результатов геоинформационного моделирования характеристик гравитационного поля показал, что в работах отсутствует оценка точности полученных моделей. Как правило, созданные произведения используются только для визуализации полученных результатов. Для использования результатов геоинформационного картографирования характеристик ГПЗ для анализа и интерпретации результатов необходимо быть уверенным, что методы и средства используемого программного продукта позволяют выполнять моделирование характеристик на исследуемую территорию с необходимой точностью.

Целью данного исследования является создание модели высот квазигеоида на локальном участке в среде ГИС с оценкой их точности по исходным данным.

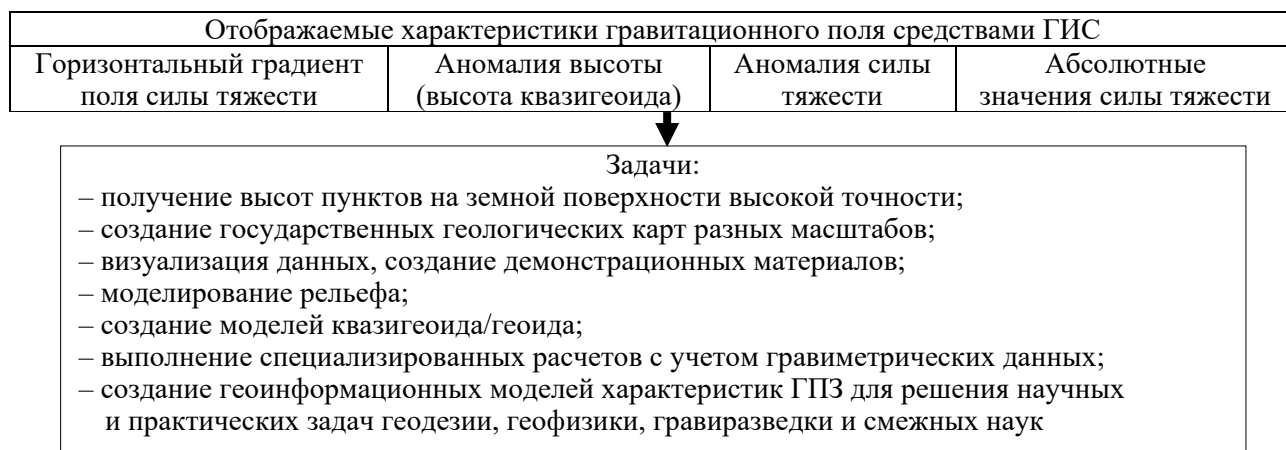


Рис. 1. Задачи, решаемые с применением средств и методов геоинформационного картографирования характеристик ГПЗ

Методы исследования

Геоинформационное моделирование высот квазигеоида выполнено средствами программного обеспечения Golden Software Surfer. Программное обеспечение Surfer разработано фирмой Golden Software специально для создания, анализа, моделирования и визуализации поверхностей [40, 41].

Для осуществления поставленной цели в работе проанализированы методы интерполирования исходных наземных данных при создании модели высот квазигеоида на территорию Новосибирской области.

Методы интерполяции: Kriging, Minimum Curvature, Modified Shepard's Method, Natural Neighbor, Nearest Neighbor, Radial Basis Function, Triangulation with Linear Interpolation, Inverse Distance to a Power, алгоритмы которых заложены в программном коде Golden Software Surfer позволяют создавать цифровые модели поверхности по неравномерно распределенным в пространстве данным.

Метод Kriging рассчитывает значение концентрации в промежуточных точках с наименьшей возможной ошибкой и решает задачу интерполяции с применением линейных оценок, при этом позволяет вклю-

чать в создаваемую модель анизотропию и тренды. При том условии, что данные имеют нормальное распределение, Kriging становится наилучшим средством прогнозирования [40, 42, 43].

Использование метода Minimum Curvature предполагает создание двухмерного сплайна с натяжением и основывается на прохождении через все точки с минимальным числом изгибов, генерируя наиболее гладкую поверхность, которая проходит настолько близко к экспериментальным точкам, насколько это возможно [43].

Modified Shepard's Method и Inverse Distance to a Power основаны на принципе распределения весов – значения, измеренные близко от интерполируемого местоположения, оказывают большее влияние на результат оценки, чем удаленные от него на значительное расстояние, т. е. точки выборки, расположенные ближе всего к точке, где выполняется оценка, имеют больший вес, а вес выборочных точек уменьшается с увеличением расстояния от интерполируемого местоположения [42, 43].

В методе Natural Neighbor оценка интерполируемой переменной определяется как среднее взвешенное значений этой переменной в выборочных точках. С помощью данного метода могут быть получены изолинейные карты хорошего качества по наборам данных, в которых содержатся скопления выборочных точек в одних подобластях и разреженные выборочные точки в других подобластях [40, 43].

Метод Nearest Neighbor применяется, если исходные выборочные точки расположены в узлах некоторой регулярной сетки, которая покрывает область исследования, или если точки незначительно смещены относительно узлов сетки [43].

Метод Radial Basis Function представляет оценку переменной в произвольной точке области исследования, которая находится как линейная комбинация значений радиальных базисных функций. Радиальная базисная функция определяет оптимальные веса, применяемые к точкам данных во время интерполяции. С помощью радиальных базисных функций создаются модели слабо изменяющихся поверхностей [40, 42].

Triangulation with Linear Interpolation использует алгоритм построения триангуляции Делоне – разбиение области исследования на совокупность треугольников, где соседние точки выборки являются вершинами треугольников, а точки соединяются так, что ребра треугольников не пересекаются. Метод является эффективным, когда требуется сохранить линии разрывов поверхности, при этом точно могут быть воспроизведены значения в выборочных точках [40, 42, 43].

С использованием всех перечисленных методов интерполяции созданы модели высот квазигеоида по данным исходной информации, неравномерно представленной на исследуемой территории.

Результаты

Исходной информацией для выполнения исследования являются значения высот квазигеоида, полученные по данным спутникового и геометрического нивелирования для 188 пунктов, расположенных на территории Новосибирской области. На рис. 2 приведена картосхема расположения пунктов, на которых выполнены спутниковые измерения и проведено геометрическое нивелирование.

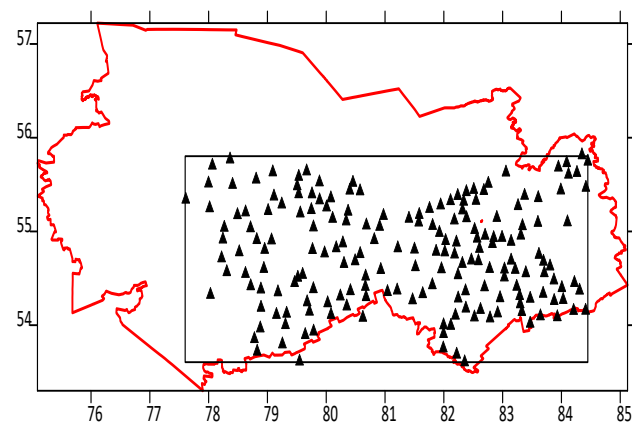


Рис. 2. Картосхема расположения пунктов на территории Новосибирской области:
▲ – исходные пункты; /– граница НСО

Технология выбора оптимального метода интерполирования высот квазигеоида для создания модели в среде ГИС с оценкой ее точности по исходным данным приведена на схеме, представленной на рис. 3.

На рис. 4–6 приведены результаты моделирования аномалий высоты на территории Новосибирской области по наземным измерениям данным с помощью методов интерполяции:

Kriging, Minimum Curvature, Modified Shepard's Method, Natural Neighbor, Nearest Neighbor, Radial Basis Function, Triangulation with Linear Interpolation, Inverse Distance to a Power.

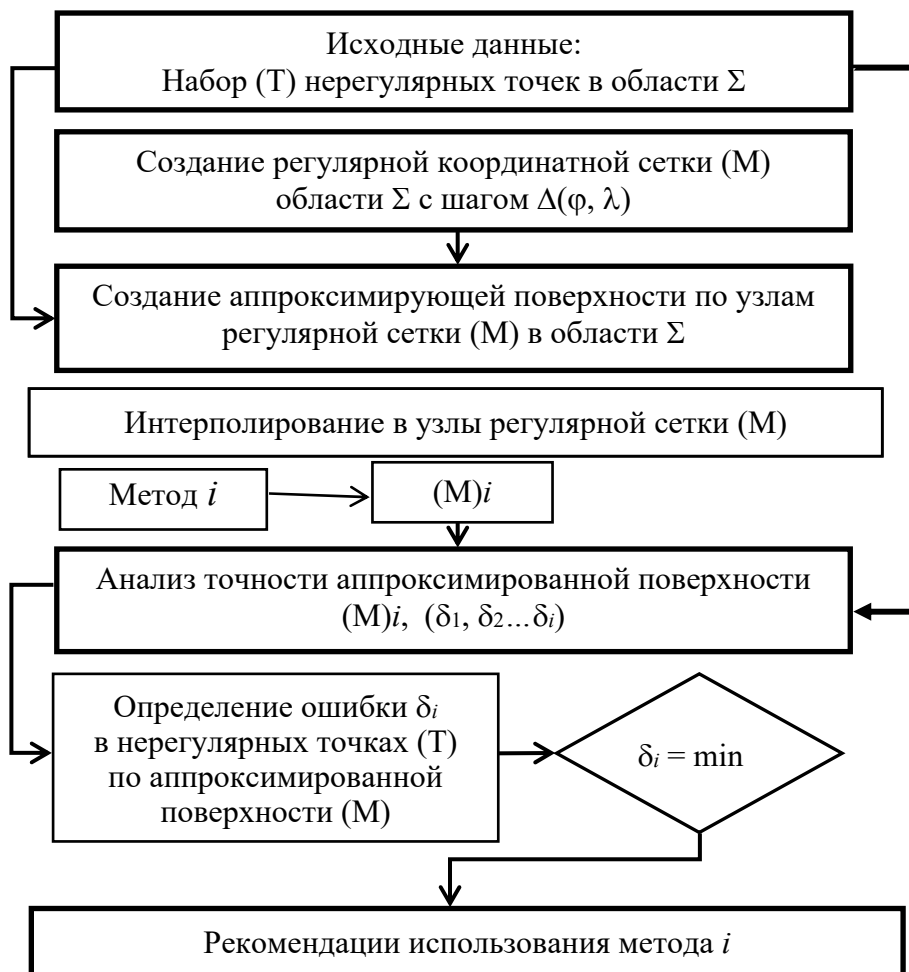


Рис. 3. Технологическая схема выбора оптимального метода интерполирования высот квазигеоида для создания модели в среде ГИС с оценкой ее точности по исходным данным

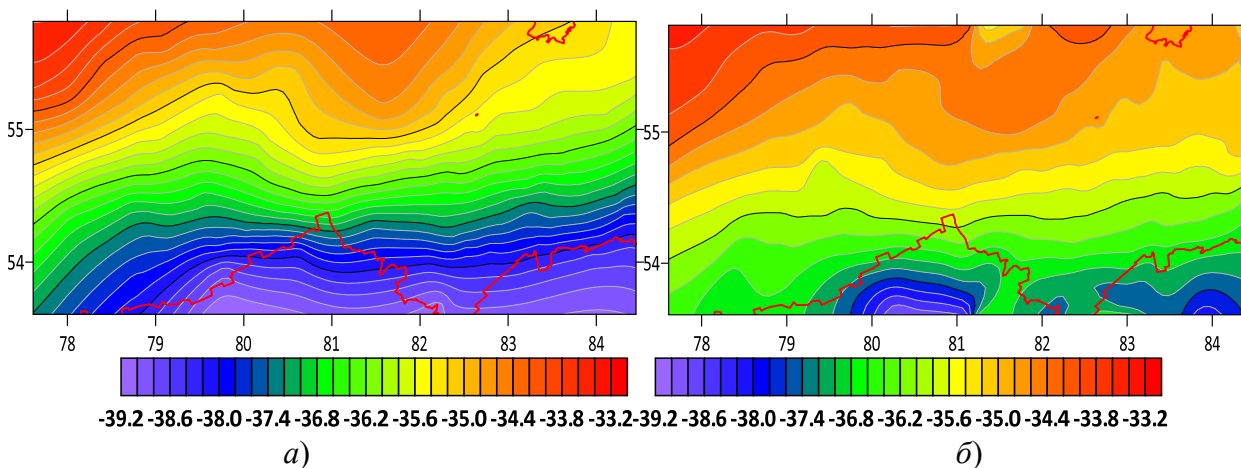


Рис. 4. Картограмма результатов моделирования аномалий высоты:
 а) методом Kriging; б) методом Modified Shepard's Method

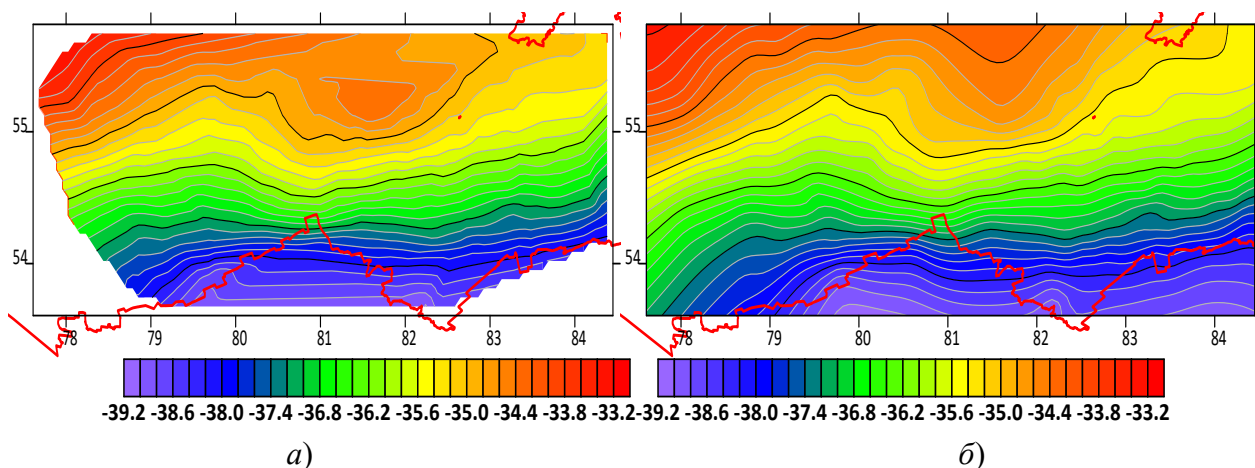


Рис. 5. Картограмма результатов моделирования аномалий высоты:
 а) методом Triangulation with Linear Interpolation; б) методом Radial Basis Function

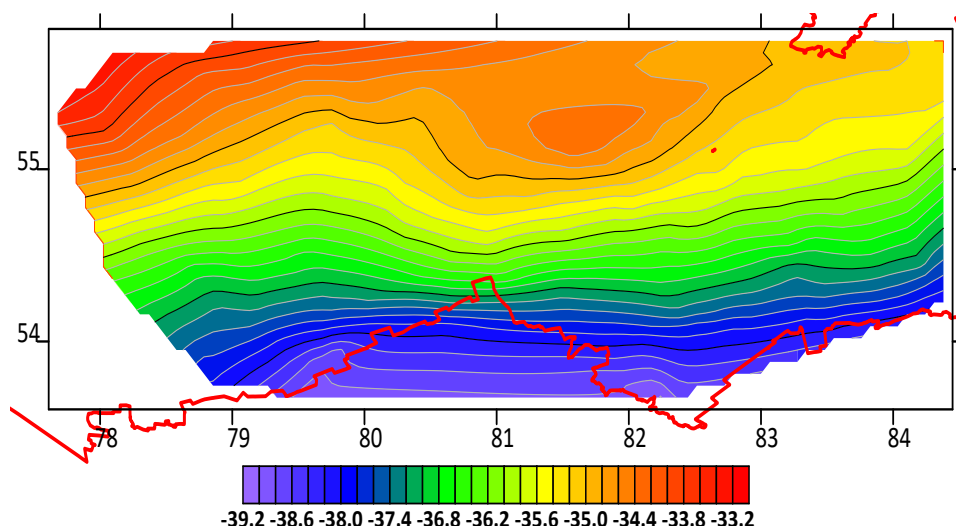


Рис. 6. Картограмма результатов моделирования аномалий высоты при использовании метода Natural Neighbor

В работе выполнено сравнение полученных моделей высот квазигеоида на заданную территорию с исходными данными и выполнен статистический анализ созданных поверхностей. Результаты статистической оценки отклонений исходных точечных значений от модельных данных приведены в таблице.

Анализируя приведенные в таблице статистические параметры распределения разностей между данными, полученными в результате измерений на пунктах исследуемой территории, и значениями, полученными в ре-

зультате интерполирования в программном продукте Surfer, можно сделать следующие выводы:

- наименьшее стандартное отклонение получено при использовании методов Modified Shepard's Method (0,005 м при среднем значении $E = 0,000\ 3$ м) и Radial Basis Function (0,005 м при среднем значении $E = 0,000\ 0$ м);
- заслуживают внимания и параметры распределения разностей методом Kriging: стандартное отклонение составило 0,015 м при среднем значении $E = -0,000\ 1$ м.

Статистическая оценка отклонений исходных точечных значений
от результирующей поверхности

Характеристика \ Метод	Kriging	Minimum Curvature	Modified Shepard's Method	Natural Neighbor	Nearest Neighbor	Radial Basis Function	Triangulation with Linear Interpolation	Inverse Distance to a Power
Количество точек	188	188	188	175	188	188	176	188
Минимум, м	-0,058	-0,061	-0,019	-0,109	-0,037	-0,019	-0,101	-0,329
Максимум, м	0,044	0,059	0,015	0,054	0,083	0,017	0,046	0,207
Диапазон, м	0,102	0,119	0,034	0,163	0,120	0,036	0,147	0,536
Среднее, м	-0,000 1	0,001 8	0,000 3	0,002 5	0,000 2	0,000 0	0,002 4	-0,001 8
Стандартное отклонение, м	0,015	0,019	0,005	0,022	0,009	0,005	0,019	0,107
Асимметрия, м	-0,548	-0,136	-0,301	-1,071	3,607	-0,403	-1,189	-0,675
Экссесс, м	1,255	0,509	2,763	4,438	46,733	1,403	5,203	0,111

Выводы. Обсуждения

Стандартные установки программного продукта Golden Software Surfer предполагают использование метода Kriging, который дает хорошие результаты аппроксимации высот квазигеоида с точностью, позволяющей проводить анализ и интерпретацию полученных результатов для решения геодезических задач.

Для создания картографических произведений характеристик ГПЗ средствами программного продукта Golden Software Surfer методы интерполирования Modified Shepard's Method и Radial Basis Function можно использовать при визуализации аномалии высоты для территорий с преобладанием равнинного рельефа с незначительными перепадами высот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Современные глобальные модели квазигеоида: точностные характеристики и разрешающая способность / В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, Е. М. Мазурова, Н. С. Косарев, А. М. Косарева // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 30–46.
2. Сравнение спутниковых моделей проекта GOCE с различными наборами независимых наземных гравиметрических данных / В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, Е. М. Мазурова, Н. С. Косарев, А. М. Косарева // Вестник СГУГиТ. – 2014. – Вып. 3 (27). – С. 21–34.
3. Исследования спектральных характеристик глобальных моделей гравитационного поля Земли, полученных по космическим миссиям CHAMP, GRACE И GOCE / А. П. Карпик, В. Ф. Канушин, И. Г. Ганагина, Д. Н. Голдобин, Е. М. Мазурова // Гироскопия и навигация. – 2014. – № 4 (87). – С. 34–44.
4. Непоклонов В. Б. Об использовании новых моделей гравитационного поля Земли в автоматизированных технологиях изысканий и проектирования [Электронный ресурс] // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2009. – № 2. – Режим доступа: <http://www.credodialogue.com/journal.aspx> (дата обращения: 17.03.2020).
5. Непоклонов В. Б., Лидовская Е. А., Спесивцев А. А. Оценка качества моделей гравитационного поля Земли // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 2. – С. 24–32.
6. Виканова А. А. Методы прогнозирования в геоинформационных системах [Электронный ресурс] // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки : сб. ст. по мат. IV междунар. студ. науч.-практ. конф. – 2012. – № 4. – С. 78–88. – Режим доступа: <http://sibac.info/archive/technic/4.pdf> (дата обращения 13.04.2020).
7. Логинов Д. С. Картографическое обеспечение геофизических исследований: современное состояние и перспективы // Геодезия и картография. – 2019. – № 8. – С. 32–44.
8. Логинов Д. С. Отечественный и зарубежный опыт геофизического картографирования // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5. – С. 71–77.

9. Логинов Д. С. Текущее состояние и перспективы использования ГИС и веб-технологий в геофизическом картографировании : тезисы материалов конференции // Национальная картографическая конференция – 2018. – Москва: Географический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, 2018. – С. 172–173.
10. Нафикова А. Р., Габбасова Р. И., Рахимова А. Р. Возможности геоинформационной системы QUANTUM GIS // Интеграция наук. – 2018. – № 5 (20). – С. 66–67.
11. Черноусова М. В., Ганагина И. Г. Сравнительный анализ создания новых систем координат и инструментов работы с ними в ГИС MapInfo и ArcGIS // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019. XV Междунар. науч. конгр.: сб. материалов в 9 т. (Новосибирск, 24–26 апреля 2019 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. Т. 6, № 1. – С. 101–107.
12. Loginov D. S. Specific features of using GIS atlases in the geophysical mapping // Proceedings of the 6th International Conference on Cartography and GIS (13-17 June 2016). – Albena, Bulgaria, 2016. – P. 61-62.
13. Басаргин А. А. Создание цифровых моделей месторождений полезных ископаемых с применением современных технологий // Вестник СГУГиТ. – 2014. – № 1 (25). – С. 34–39.
14. Боярчук М. А., Журкин И. Г., Непоклонов В. Б. Анализ методов визуализации геофизических полей в геоинформационных системах // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 1. – С. 108–113.
15. Боярчук М. А., Журкин И. Г., Непоклонов В. Б. Концепция графического метода отображения гравитационного поля Земли на плоскости // Научная визуализация. – 2019. – Т. 1, № 1. – С. 70–79.
16. Васильев В. В., Васильева Е. Г., Теплякова Е. А. Геофизическое картирование арктического шельфа для составления геофизических основ Госгеолкарты-1000 // Разведка и охрана недр. – 2007. – № 9. – С. 64–69.
17. Геоинформационные технологии для природопользования [Электронный ресурс] // ГИС INTEGR0. – Режим доступа: <http://www.gis-integro.ru/geophysic/> (дата обращения: 13.03.2020).
18. Логинов Д. С. Применение геоинформационных технологий в геофизическом картографировании // Славянский форум. – 2015. – № 4 (10). – С. 192–201.
19. Годжаманов М. Г. Методика построения детальной карты высот квазигеоида на территории Азербайджана // Bakı universitetinin xəbərləri. – 2008. – № 1. – С. 169–173.
20. Годжаманов М. Г. Разработка современных технологий реконструкции и развития государственной геодезической сети с учетом особенностей территории Азербайджанской Республики : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2005. – 48 с.
21. Долгаль А. С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемок в горной местности. – Абакан: ООО Фирма «Март», 2002. – 188 с.
22. Карта абсолютных значений поля силы тяжести территории Украины и некоторые аспекты ее возможной интерполяции / В. А. Ентин, С. И. Гуськов, М. И. Орлюк, О. Б. Гинтов, Р. В. Осьмак // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37, № 1. – С. 53–63.
23. Васильев В. В. Актуализация гравиметрических данных на Западно-Арктическом шельфе с использованием геоинформационных технологий // Геоинформатика. – 2009. – № 2. – С. 41–47.
24. Мазурова Е. М., Огиенко С. А. Отображение геодезических данных в ArcGIS // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 5. – С. 34–42.
25. Огородова И. В. Использование ГИС-технологий для трехмерной визуализации геофизической информации // Геофизика. – 2016. – № 5. – С. 32–46.
26. Алексеева М. Л., Кривошеев Д. А. Расширенные возможности автоматизации геообработки на примере ESRI ArcGIS // Информационные технологии. Проблемы и решения: мат. междунар. научно-практической конференции. – Уфа : УГНТУ, 2014. – № 1-1 (1). – С. 46–49.
27. Симанов А. А. Информационно-аналитическая система обработки материалов гравиметрических съемок // Материалы 33-й сессии Международного семинара им. Д. Г. Успенского. – Екатеринбург : Институт геофизики УрО РАН, 2006. – С. 328–330.
28. Симанов А. А., Пугин А. В. Применение современных геоинформационных технологий при хранении и обработке геолого-геофизических данных // ГЕО-Сибирь-2006. II Междунар. науч. конгр.: сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2006 г.). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 3, ч. 1. – С. 159–163.
29. Крылов В. И., Яшкин С. Н. Кватернионы и их использование в теории вращений пространств // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 6. – С. 3–6.
30. Программное обеспечение для геофизики [Электронный ресурс] // Азимут геология: геолого-геофизическая компания. – Режим доступа:

http://azimut-geology.kz/program_geo/ (дата обращения: 17.03.2020).

31. Спиридонов В. А. Экспертное редактирование при автоматизированном создании геологических карт // Геоинформатика. – 2005. – № 1. – С. 7–13.

32. Черемисина Е. Н., Финкельштейн М. Я., Любимова А. В. ГИС INTEGR0 – импортозамещающий программно-технологический комплекс для решения геолого-геофизических задач // Геоинформатика. – 2018. – № 3. – С. 8–17.

33. Шумихин А. С. Особенности архитектуры ГИС INTEGR0 // Геоинформатика. – 2018. – № 3. – С. 68–75.

34. Бусыгин Б. С., Никулин С. Л., Бойко В. А. Геоинформационная система РАПИД как средство мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций: сб. трудов 9 Междунар. конф. «Стихия-2006». – Севастополь: СНУЯЕтаП, 2006. – С. 21–33.

35. Бусыгин Б. С., Никулин С. Л., Бойко В. А. ГИС-технология поисков золота в Западном Узбекистане // Геоинформатика. – 2006. – № 1. – С. 44–49.

36. Бусыгин Б. С., Никулин С. Л. Специализированная геоинформационная система РАПИД: структура, технология, задачи // Геоинформатика. – 2016. – № 1 (57). – С. 22–36.

37. Геоинформационная система интегрированного анализа разнородных и разноуровневых данных РАПИД [Электронный ресурс] // Национальный ТУ «Дніпровська політехніка». – відповідність Часу. – Режим доступа: http://science.nmu.org.ua/ru/ndc/int_

scien_projects/horizont20200/14.php. (дата обращения: 18.03.2020).

38. Пивняк Г. Г., Бусыгин Б. С., Никулин С. Л. ГИС-технология интегрированного анализа разнородных и разноуровневых геоданных // Доповіді Національної академії наук України. – 2007. – № 7. – С. 121–128.

39. Ермолаев Н. Р. Использование программного обеспечения QGIS при подготовке картографического материала // Ломоносов-2018: тезисы докладов XXV Междунар. научной конф. студ., аспирантов и молодых ученых. – М.: ООО «МАКС Пресс», 2018. – С. 250–251.

40. Дреева Ф. Р., Реутова Н. В., Реутова Т. В. Решение задач картографирования гидрохимической информации с помощью геоинформационной системы Surfer // Изв. Кабардино-Балкарского научного Центра РАН. – 2018. – № 5 (85). – С. 12–17.

41. Мыслыва Т. Н., Куцаева О. А., Подлесный А. А. Сравнение эффективности методов интерполяции на основе ГИС для пространственного распределения гумуса в почве // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 4. – С. 146–152.

42. Крюкова С. В., Симакина Т. В. Оценка методов пространственной интерполяции метеорологических данных // Общество. Среда. Развитие (Тerra Humana). – 2018. – № 1. – С. 144–151.

43. Мальцев К. А., Мухарамова С. С. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer): учеб. пособие. – Казань: Казанский университет, 2014. – 103 с.

Получено 21.04.2020

© И. Г. Ганагина, Д. С. Челнокова, Д. Н. Голдобин, 2020

CREATION OF A QUASIGEOID MODEL ON A LOCAL SECTION BY GIS MEANS

Irina G. Ganagina

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Head of the Department of Space and Physical Geodesy, e-mail: gam0209@yandex.ru

Darya S. Chelnokova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Master Student, phone: (905)956-44-74, e-mail: sergeevna0403@gmail.com

Denis N. Goldobin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Engineer, Department of Space and Physical Geodesy, e-mail: phis.geo.sggs@gmail.com

The capabilities of fully functional geographic information systems used in various fields make it possible to simulate the characteristics of the gravitational field, presenting measuring information in the form of continuous surfaces, thereby expanding the area of use of data on the Earth's gravitational field. An important stage of visualization is the choice of a method of interpolating data that provides the highest possible accuracy in creating a digital model of the studied characteristic of the gravitational field. The authors developed a technology for choosing the optimal method for interpolating the characteristics of the Earth's gravitational field in a GIS to create models with an assessment of their accuracy according to the initial data, presented in the form of a technological scheme. The possibilities of the Golden Software Surfer software product for creating a model of quasi-geoid heights from the unevenly presented satellite and geometric leveling data in the study area are considered. A method for interpolating the heights of a quasi-geoid in Golden Software Surfer is proposed, a model of a quasi-geoid in a local area is created. An assessment of the accuracy of the created model according to the initial data is performed.

Key words: approximation of the source data, geographic information systems, geospatial modeling, interpolation methods, Earth's gravitational field, quasigeoid height.

REFERENCES

1. Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Mazurova, E. M., Kosarev, N. S., & Kosareva A. M. (2017). Modern global quasigeoid models: accuracy characteristics and resolving power. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(1), 30–46 [in Russian].
2. Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., Mazurova, E. M., Kosarev, N. S., & Kosareva A. M. (2014). Comparison of satellite models of the GOCE project with various sets of independent ground-based gravity data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 3(27), 21–34 [in Russian].
3. Karpik, A. P., Kanushin, V. F., Ganagina, I. G., Goldobin, D. N., & Mazurova, E. M. (2014). Studies of the spectral characteristics of global models of the Earth's gravitational field obtained from the space missions CHAMP, GRACE and GOCE. *Giroskopiya i navigatsiya [Gyroscopy and Navigation]*, 4(87), 34–44 [in Russian].
4. Nepoklonov, V. B. (2009). On the use of new models of the Earth's gravitational field in automated technologies for research and design. *Avtomatizirovannye tekhnologii izyskaniy i proektirovaniya [Automated Technologies for Research and Design]*, 2. Retrieved from: <http://www.credodialogue.com/journal.aspx> (accessed 17.03.2020) [in Russian].
5. Nepoklonov, V. B., Lidovskaya, E. A., & Spesivtsev, A. A. (2014). Estimation of the quality of models of the Earth's gravitational field. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 2, 24–32 [in Russian].
6. Vikanova, A. A. (2012). Methods of forecasting in geographic information systems (n. d.). In *Sbornik materialov IV mezhdunarodnoy studentcheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Vol. 4. Nauchnoye soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskiye nauki [Proceedings of IV International Student Scientific and Practical Conference: Vol. 4. Scientific Community of Students of the XXI Century. Technical Sciences]* (pp. 78–88). Retrieved from <http://sibac.info/archive/technic/4.pdf> (accessed 13.04.2020) [in Russian].
7. Loginov, D. S. (2019). Cartographic support of geophysical research: current status and prospects. *Geodeziya i Kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 8, 32–44 [in Russian].
8. Loginov, D. S. (2015). Domestic and foreign experience of geophysical mapping. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 5, 71–77 [in Russian].
9. Loginov, D. S. (2018). Current status and prospects for the use of GIS and web technologies in geophysical mapping: abstracts of conference materials. In *Sbornik tezisev Natsional'noi kartograficheskoi konferentsii – 2018 [Collection abstracts of National Cartographic Conference – 2018]* (pp. 172–173). Moscow: Geography Department of Moscow State University named after M.V. Lomonosov Publ. [in Russian].
10. Nafikova, A. R., Gabbasova, R. I., & Rakhimova, A. R. (2018). Possibilities of the geographic information system QUANTUM GIS. *Integratsiya nauk [Integration of Sciences]*, 5(20), 66–67 [in Russian].
11. Chernousova, M. V., & Ganagina, I. G. (2019). Comparative analysis of the creation of new coordinate systems and tools for working with them in the GIS MapInfo and ArcGIS. In *Sbornik materialov Interexpo GEO-Sibir'-2019: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 6, ch. 1. Magisterskaya nauchnaya sessiya "Pervyye shagi v nauke" [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2019: International*

Scientific Conference: Vol. 6, Part 1. Master's Scientific Session "First Steps in Science"] (pp. 101–107). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].

12. Loginov, D. S. (2016). Specific features of using GIS atlases in the geophysical mapping. *Production of the 6th International Conference on Cartography and GIS* (pp. 61–62). Albena, Bulgaria.

13. Basargin, A. A. (2014). Creation of digital models of mineral deposits using modern technologies. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(25), 34–39 [in Russian].

14. Boyarchuk, M. A., Zhurkin, I. G., & Nepoklonov, V. B. (2017). Analysis of visualization methods of geophysical fields in geographic information systems. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 1, 108–113 [in Russian].

15. Boyarchuk, M. A., Zhurkin, I. G., & Nepoklonov, V. B. (2019). The concept of the graphical method for displaying the Earth's gravitational field on the plane. *Nauchnaya vizualizaciya [Scientific Visualization]*, 1(1), 70–79 [in Russian].

16. Vasiliev, V. V., Vasielieva, E. G., & Teplyakova, E. A. (2007). Geophysical mapping of the Arctic shelf for the compilation of geophysical foundations of the State Geological Map-1000. *Razvedka i ohrana nedr [Exploration and Mineral Protection]*, 9, 64–69 [in Russian].

17. Geoinformation technologies for nature management (n. d.). Retrieved from <http://www.gis-integro.ru/geophysic/> (accessed 13.03.2020) [in Russian].

18. Loginov, D. S. (2015). Application of geographic information technologies in geophysical mapping. *Slavyanski forum [Slavic Forum]*, 4(10), 192–201 [in Russian].

19. Gojamanov, M. G. (2008). Method for constructing a detailed map of the heights of a quasi-geoid on the territory of Azerbaijan. *Baki universitetinin xəbərləri [News of Baku University]*, 1, 169–173 [in Russian].

20. Godzhamanov, M. G. (2005). Development of modern technologies for reconstruction and development of the state geodetic network, taking into account the characteristics of the territory of the Republic of Azerbaijan. *Extended abstract of doctoral thesis*. Moscow, 48 p. [in Russian].

21. Dolgal, A. S. (2002). *Komp'yuternyye tekhnologii obrabotki i interpretatsii dannykh gravimetricheskoy i mag-nitnoy s'yemok v gornoy mestnosti [Computer technology for processing and interpreting data of gravimetric and magnetic surveys in mountainous areas]*. Abakan: LLC Firm Mart Publ., 188 p. [in Russian].

22. Entin, V. A., Guskov, S. I., Orlyuk, M. I., Gintov, O. B., & Osmak, R. V. (2015). Map of the absolute values of the gravity field of the territory of Ukraine and some aspects of its possible interpolation. *Geofizicheskiy zhurnal [Geophysical Journal]*, 37(1), 53–63 [in Russian].

23. Vasiliev, V. V. (2009). Actualization of gravimetric data on the West Arctic shelf using geoinformation technologies. *Geoinformatika [Geoinformatics]*, 2, 41–47 [in Russian].

24. Mazurova, E. M., & Ogienko, S. A. (2013). Mapping of geodetic data in ArcGIS. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 5, 34–42 [in Russian].

25. Ogorodova, I. V. (2016). Use of GIS-technologies for three-dimensional visualization of geophysical information. *Geofizika [Geophysics]*, 5, 32–46 [in Russian].

26. Alekseeva, M. L., & Krivosheev, D. A. (2014). Advanced capabilities for automating geoprocessing using ESRI ArcGIS as an example. In *Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: No 1-1 (1). Informatsionnyye tekhnologii. Problemy i resheniya [Proceedings of International Scientific and Practical Conference: No 1-1 (1). Information Technology. Problems and Solutions]* (pp. 46–49). Ufa: UGNTU Publ. [in Russian].

27. Simanov, A. A. (2006). Information-analytical system for processing materials of gravimetric surveys. In *Materialy 33-y sessii Mezhdunarodnogo seminar imeni D. G. Uspenskogo [Proceedings of the 33rd Session of the International Seminar named after D. G. Uspensky]*. (pp. 328–330). Yekaterinburg: Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ. [in Russian].

28. Simanov, A. A., & Pugin, A. V. (2006). The use of modern geoinformation technologies in the storage and processing of geological and geophysical data. In *Sbornik materialov GEO-Sibir'-2006: T. 3, ch. 1 [Proceedings of GEO-Siberia-2006: Vol. 3, Part. 1]* (pp. 159–163). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].

29. Krylov, V. I., & Yashkin, S. N. (2016). Quaternions and their use in the theory of rotations of spaces. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 6, 3–6 [in Russian].

30. Software for geophysics (n. d.). Retrieved from: http://azimut-geology.kz/program_geo/. (accessed 03/17/2020) [in Russian].

31. Spiridonov, V. A. (2005). Expert editing in automated creation of geological maps. *Geoinformatika [Geoinformatics]*, 1, 7–13 [in Russian].

32. Cheremisina, E. N., Finkelshtein, M. Ya., & Lyubimova, A. V. (2018). GIS INTEGRO - an import-substituting software and technology complex for solving geological and geophysical problems. *Geoinformatika [Geoinformatics]*, 3, 8–17 [in Russian].
33. Shumikhin, A. S. (2018). Features of the GIS architecture INTEGRO. *Geoinformatika [Geoinformatics]*, 3, 68–75 [in Russian].
34. Busygin, B. S., Nikulin, S. L., & Boyko, V. A. (2006). Geographic information system RAPID as a means of monitoring and forecasting emergencies. In *Sbornik trudov 9 Mezhdunarodnoy konferentsii "Stikhiya-2006" [Proceedings of the 9th International Conference "Element 2006"]* (pp. 21–33). Sevastopol: SNUYaETAP Publ. [in Russian].
35. Busygin, B. S., Nikulin, S. L., & Boyko, V. A. (2006). GIS technology for gold prospecting in Western Uzbekistan. *Geoinformatika [Geoinformatics]*, 1, 44–49 [in Russian].
36. Busygin, B. S., & Nikulin, S. L. (2016). Specialized geographic information system RAPID: structure, technology, tasks. *Geoinformatika [Geoinformatics]*, 1(57), 22–36 [in Russian].
37. Geoinformation system of integrated analysis of heterogeneous and multilevel data RAPID (n. d.). Retrieved from: http://science.nmu.org.ua/en/ndc/int_scien_projects/horizont_20200/14.php. (accesses 18.03.2020) [in Russian].
38. Pivnyak, G. G., Busygin, B. S., & Nikulin, S. L. (2007). GIS-technology for integrated analysis of heterogeneous and multilevel geodata. *Dopovidi Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny [Additional National Academy of Sciences of Ukraine]*, 7, 121–128 [in Russian].
39. Ermolaev, N. R. (2018). The use of QGIS software in the preparation of cartographic material. In *Tezisy dokladov XXV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh: Lomonosov-2018 [Abstracts of XXV International Scientific Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists: Lomonosov-2018 Reports]* (pp. 250–251). Moscow: LLC MAX Press Publ. [in Russian].
40. Dreeva, F. R., Reutova, N. V., & Reutova, T. V. (2018). Solution of the problems of mapping hydro-chemical information using the Surfer geographic information system. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo Tsentra RAN [Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*, 5(85), 12–17 [in Russian].
41. Myslyva, T. N., Kutsaeva, O. A., & Podlesny, A. A. (2017). Comparison of the efficiency of GIS-based interpolation methods for the spatial distribution of humus in soil. *Vestnik Belorusskoy Gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy]*, 4, 146–152 [in Russian].
42. Kryukova, S. V., & Simakina, T. V. (2018). Evaluation of spatial interpolation methods for meteorological data. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye [Society. Wednesday. Development]*, 1, 144–151 [in Russian].
43. Maltsev, K. A., & Mukharamova, S. S. (2014). *Postroyeniye modeley prostranstvennykh peremennykh (s primeneniym paketa Surfer) [Construction of models of spatial variables (using the Surfer package)]*. Kazan: Kazan University Publ., 103 p. [in Russian].

Received 21.04.2020

© I. G. Ganagina, D. S. Chelnokova, D. N. Goldobin, 2020