

## ГЕОФИЗИКА

УДК: 550.831.23

**Определение переменной плотности промежуточного слоя на Губахинском участке (Пермский край)****А.П. Шелихов**

Тюменский индустриальный университет

625000, Тюмень, ул. Володарского, 38. E-mail: shelihovap@tyuiu.ru

*(Статья поступила в редакцию 31 августа 2022 г.)*

В результате совершенствования аппаратуры и технологии производства гравиметрических работ происходит непрерывное повышение точности вычисления аномалий силы тяжести в редукции Буге. Вместе с тем в аномалиях растет относительная доля погрешности, обусловленная неадекватным учетом плотности промежуточного слоя, принимаемой при редуцировании за константу. В статье описан опыт использования трехточечной формулы В.М. Березкина для построения карты площадного распределения плотности промежуточного слоя и расчета на ее основе аномалий в редукции Буге по данным высокоточных гравиметрических работ на Губахинском участке.

Ключевые слова: *высокоточная гравиразведка, формула Березкина, статистический подход, переменная плотность, промежуточный слой.*

DOI: 10.17072/psu.geol.21.4.341

**Введение**

Определение истинной плотности промежуточного слоя конкретного участка является вопросом, который всякий раз после завершения высокоточных полевых работ вынуждены решать гравиметристы, прежде чем приступить к обработке и интерпретации своих материалов. Автор занимался этим на протяжении многих лет, вычисляя плотность по трехточечной формуле (Березкин, 1967). В силу специфики региона проведения работ, а это центральная часть Западносибирской низменности с весьма слабо выраженным рельефом, среднюю плотность приходилось определять на основе большой выборки с малыми перепадами высот. Геометрия полевых наблюдений и точность работ не позволяли сделать ничего большего.

Все изменилось, когда в распоряжение автора попали результаты современной съемки масштаба 1:25 000, выполненной по практически идеальной равномерной сети 200x200 м с погрешностями полевых измерений кратно меньшими погрешностей съемок 80-х гг.

Как показал опыт, использование современных высокоточных гравиметрических

данных позволяет не только с высокой степенью достоверности определять среднюю плотность рельефообразующих пород участка исследований, но и оценивать распределение этой плотности по площади (Шелихов, 2022).

Полевые материалы, использованные в настоящей работе, получены на участке с резко выраженным рельефом местности и контрастным плотностным строением верхней части разреза, что позволило достичь интересных результатов.

**Краткая история вопроса**

Впервые способ определения плотности рельефообразующих пород с помощью профильных гравиметрических измерений был предложен Л.Л. Неттлтоном в 1939 г. (Неттлтон, 1939). С той поры способы вычисления плотности, основанные на минимизации коэффициента корреляции аномалий Буге с рельефом дневной поверхности, получили самое широкое распространение.

В 1956 г. Р. Вайк первым поднял вопрос о необходимости при вычислении аномалий в редукции Буге учета переменной плотности приповерхностных отложений (Вайк, 1956).

Для минимизации ошибок, вносимых при редуцировании, он предложил учитывать в качестве переменной только плотность локальных форм рельефа выше базового уровня. За базовый уровень, ниже которого плотность учитывается как постоянная, может быть принята минимальная отметка рельефа или же некая поверхность в зависимости от конкретных условий.

Практическую реализацию этих подходов в 1962 г. предложили Ф.С. Грант и А.Ф. Эльсахарти. В своей работе (Грант, Эльсахарти, 1962) они теоретически обосновали и практически реализовали методику, основанную на минимизации корреляции локальных составляющих аномалий Буге и рельефа дневной поверхности. В результате ими были получены исправленная карта аномалий Буге и карта распределения плотности промежуточного слоя.

В 1967 г. В.М. Березкин в своей монографии (Березкин, 1967) вместе с целым рядом различных методик предложил способ определения плотности приповерхностных отложений на основе решения систем линейных уравнений. В настоящей работе использована его трехточечная формула. Геометрия исходных данных при этом позволяет относить результат вычисления к конкретному пункту гравиметрических наблюдений – центру вычислительной триады.

Ниже кратко изложены методические подходы и полученные результаты проведенной работы.

### Характеристика исходных данных

Участок работ расположен в западном Приуралье в районе города Губаха Пермского края. Масштаб гравиметрической съемки – 1:50 000. Съемка выполнена на 2 832 пунктах, из них на 2 502 по сети наблюдений 1000×200 м и на 230 пунктах (на участке детальных работ) по сети 500×100 м. Размеры площади примерно 18×27 км (490 км<sup>2</sup>), рельеф сильно расчлененный, перепад высот от 142 м до 503 м, местность полностью занесенная. Погрешность определения высот – ±0.07 м, погрешность определения наблюдаемых значений силы тяжести – ±0.043 мГал.

Съемка выполнена в летний период. Данное обстоятельство является весьма благоприятным для решения поставленной задачи, поскольку исключает погрешность, вносимую вариациями плотности и погрешностью измерения мощности снежного покрова.

### Методика работ

Площадное распределение плотности верхней части разреза рассчитывалось на основе единичных вычислений плотности по трёхточечной формуле В.М. Березкина. Формула справедлива для случая линейного характера изменения силы тяжести на поверхности относимости. Необходимо отметить, что в формуле, приведенной в авторской монографии (Березкин, 1967), нами была обнаружена ошибка в виде неверного знака (плюс вместо минуса) в знаменателе перед поправочным коэффициентом к приращению поправки за рельеф.

Ниже приведена исправленная трёхточечная формула, использованная в настоящей работе:

$$\sigma = \frac{0.3086 \Delta H + \Delta G}{0.0419 \Delta H - \alpha \Delta PR}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, равный обратному значению плотности, принятой при определении поправки за рельеф.

Переменные  $\Delta H$ ,  $\Delta G$  и  $\Delta PR$  можно охарактеризовать как превышения, соответственно, альтитуды, наблюдаемого значения силы тяжести и поправки за рельеф в центральной точке вычислительной триады относительно среднего из значений этих параметров на крайних точках:

$$\begin{aligned} \Delta H &= h_2 - (h_1 + h_3)/2 \\ \Delta G &= g_2^H - (g_1^H + g_3^H)/2 \\ \Delta PR &= g_2^{PR} - (g_1^{PR} + g_3^{PR})/2. \end{aligned}$$

Все вычисления были выполнены в табличном процессоре Excel с использованием авторских макросов. Шаг вычислений равен шагу съемки по профилю (200 м или 100 м в случае участка детальных работ). Вычисление плотности выполнялось по формуле 1 при соблюдении двух следующих условий.

Во-первых, абсолютное превышения альтитуды центральной точки (АЦТ) вычислительной триады,  $\Delta H$ , должно быть не меньше

0.25 м и, во-вторых, соотношение длин её плеч не должно превышать двух крат.

Первое условие устанавливает величину минимального, достоверно определенного превышения АЦТ и вычислено как значение, превышающее утроенную погрешность определения высотного положения гравиметрических пунктов площади исследований.

Второе условие исключает вычисление плотности при переходе с профиля на профиль и при фактическом отсутствии на профиле более чем одного проектного пункта. При этом изгиб линии вычислений в плане никак не учитывался.

Полученный массив плотностей был подвергнут процедуре статистической очистки от «грубых» значений. Для этого в итерационном режиме из него были исключены значения, отклоняющиеся от среднего на величину, превышающую утроенное стандартное отклонение.

Необходимо отметить, что строгое следование указанному выше критерию справедливо только для стационарных случайных распределений. В нашем случае изучаемый параметр – плотность промежуточного слоя (ППС) – не стационарен по площади. Именно его площадное распределение и является целью исследований. В их результате, как будет показано ниже, установлено, что ППС на изучаемом участке изменяется более, чем в пределах от  $2.3 \text{ г/см}^3$  до  $2.6 \text{ г/см}^3$ . Иными словами, диапазон изменения плотностей на площади составляет  $\pm 0.15 \text{ г/см}^3$  от среднего значения  $2.45 \text{ г/см}^3$ .

На этом основании в ходе исследований наряду с массивом плотностей, сформированным с применением строгого статистического критерия отбраковки, был сформирован массив с критерием отбраковки, расширенным на величину  $\pm 0.15 \text{ г/см}^3$ .

Расширенная выборка содержит 2150 значений плотности, что превышает объем выборки, полученной по строгому критерию, всего на 21 значение, или менее чем на 1%. Таким образом статистически однородные выборки плотностей промежуточного слоя были сформированы в 76% достаточно равномерно расположенных гравиметрических пунктах площади. За координаты точек вы-

числения плотности были приняты координаты центральных точек вычислительных триад.

По сформированным выборкам была выполнена оценка погрешности вычисления плотности в зависимости от абсолютного превышения альтитуды центральной точки ( $\Delta H$ ). Для этого по каждому массиву, предварительно отсортированному по возрастанию абсолютного значения  $\Delta H$ , в окне размером 100 точек с таким же шагом были рассчитаны: среднее превышение АЦТ, средняя плотность и стандартное отклонение в окне.

На рис. 1 приведена диаграмма, отражающая связь стандартного отклонения плотности с абсолютным превышением АЦТ для расширенной выборки.

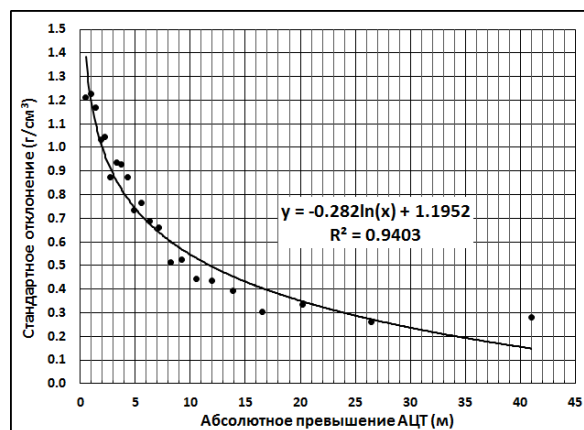


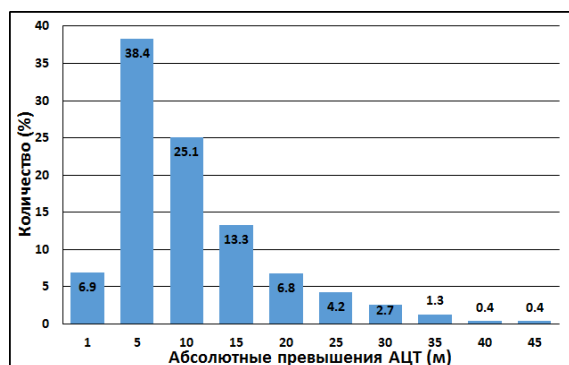
Рис. 1. Связь погрешности вычисления плотности с превышением альтитуды центральной точки

Из диаграммы следует, что в зависимости от величины абсолютного значения  $\Delta H$  стандартное отклонение изменяется от  $1.25 \text{ г/см}^3$  при минимальных абсолютных превышениях до  $0.25 \text{ г/см}^3$  при превышениях АЦТ порядка 25–30 м. При среднем по выборке превышении, равном 8.5 м, стандартное отклонение составляет величину порядка  $0.5 \text{ г/см}^3$ . Следовательно, если при расчёте регулярной сетки выполнять осреднение в скользящем окне, включающем 100 значений, плотность в ее узле будет определяться в среднем с погрешностью  $\pm 0.05 \text{ г/см}^3$ .

Поскольку величина абсолютного превышения альтитуды центральной точки при прочих равных условиях оказывает решаю-

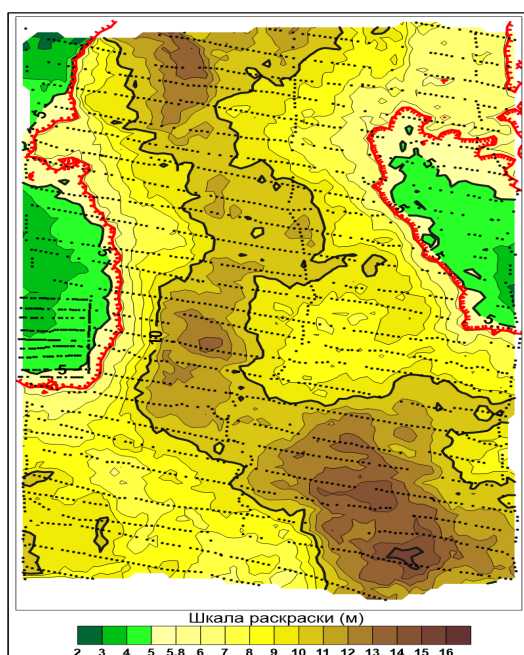
щее влияние на достоверность единичного вычисления плотности по формуле 1, для наглядности на рис. 2 приведена гистограмма, а на рис. 3 – карта распределения абсолютных превышений АЦТ на площади исследований.

Из гистограммы, в частности, видно, что минимальных превышений (от 0.25 м до 1 м) в расширенной выборке около 6.9%, а превышений свыше 5 м существенно больше половины (около 55%).



**Рис. 2.** Гистограмма распределения абсолютных превышений альтитуды центральной точки

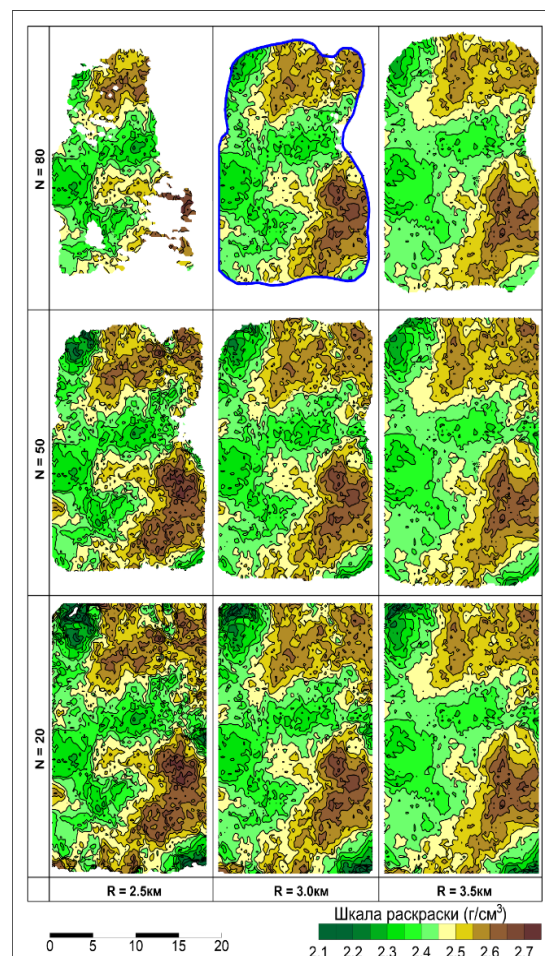
Медианное значение превышения (5.7 м), показано на карте распределения абсолютных превышений АЦТ (рис. 3) изолинией красного цвета.



**Рис. 3.** Карта распределения абсолютных превышений альтитуды центральной точки

Поскольку участок детальных работ с повышенной плотностью точек вычисления плотности компактно находится в зоне с относительно слабо выраженным рельефом (значения  $\Delta H$  меньше медианного), точки вычисления ППС со значениями  $\Delta H$  больше медианного занимают существенно большую часть изучаемой площади – 85% (см. рис. 3).

По двум массивам плотностей промежуточного слоя (стандартному и расширенному) средствами пакета Surfer были рассчитаны и построены соответствующие карты площадного распределения ППС. В качестве способа расчёта регулярной сетки (грида) был использован метод осреднения в скользящем окне (Moving Average). В качестве расширенных опций метода использованы различные радиусы скользящего окна круглой формы (R) и различное количество данных в окне (N), меньше которого значение в узле грида не вычисляется.



**Рис. 4.** Варианты карт ППС, построенных по стандартной выборке

Карты ППС с различными параметрами, построенные по стандартной и расширенной выборкам, были сведены в кросс-плоты и приведены, соответственно, на рис. 4 и 5. Варианты карт ранжированы слева-направо по возрастанию параметра R и снизу-вверх по возрастанию параметра N.

Визуальный анализ рисунков наглядно демонстрирует уменьшение детальности вариантов карт при увеличении радиуса скользящего окна R и уменьшение размеров области построения при увеличении минимально допустимого количества точек в окне.

Анализ характера влияния параметров скользящего окна на результаты расчёта регулярных сеток позволил выбрать оптимальный, на наш взгляд, способ формирования итоговой карты.

Ниже приводится описание результатов работ с оценкой достоверности выполненных построений.

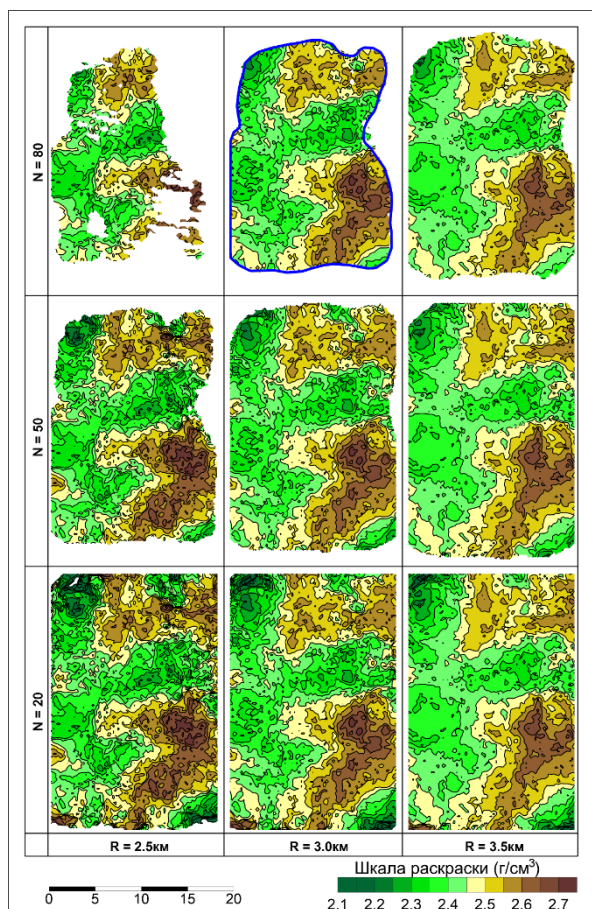


Рис. 5. Варианты карт ППС, построенных по расширенной выборке

## Результаты работ

В качестве результирующих карт площадного распределения ППС для использования их при вычислении аномалий в редукции Буге по обоим вариантам выборок были построены карты, полученные путем осреднения трех регулярных сеток. Входные сетки для этого были рассчитаны методом осреднения в скользящем окне (Moving Average) с шагом 0.25 км с различными параметрами R (2.5, 3.0 и 3.5 км) при одинаковом параметре N=20 (см. нижние ряды карт на рис. 4 и 5).

Для осреднения три регулярные сетки каждого варианта распределения были конвертированы в текстовые файлы. Вычисление среднего из трех значений плотности в каждом узле выполнено в табличном процессоре Excel.

Результирующий грид каждого варианта рассчитан тем же методом с параметрами R=0.3 км, N=1. При таких параметрах каждый узел выходной сетки рассчитывается как среднее из значений 5 узлов входной сетки, что обеспечивает минимальное сглаживание результата.

Результирующие карты площадного распределения плотности промежуточного слоя, построенные по обоим вариантам выборок, приведены на рис. 6.

На карты плотностей дополнительно вынесены: центры вычислительных триад (точки вычисления ППС), граница карты с параметрами R=3,0 км, N=80 – синий контур, внутри которого количество точек осреднения при вычислении узлов грида ППС превышает 80 и изолинии погрешности вычисления ППС (ЕППС) – красные линии с берг-штрихом.

Распределение погрешности вычисления ППС ( $E_{ппс}$ ) получено из распределения абсолютных превышений альтитуды центральной точки  $\Delta H$  (рис. 3) по формуле:

$$E_{ппс} = \frac{f(\Delta H)}{\sqrt{80}}$$

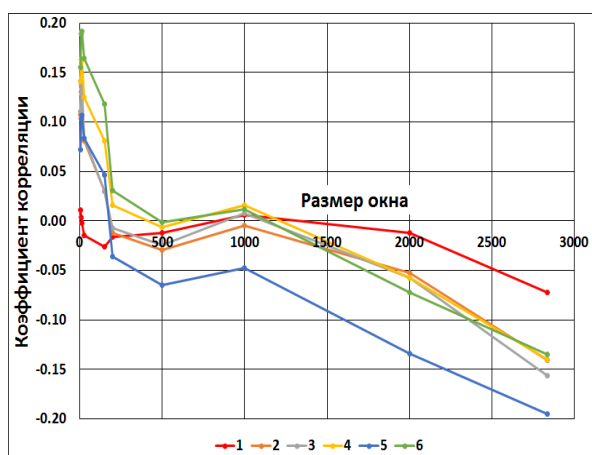
где  $f(\Delta H)$  – формула тренда, характеризующего связь стандартного отклонения вычисленных значений плотности с превышением  $\Delta H$  для соответствующей выборки (см. рис. 1). Оче-



Были использованы аномалии Буге обоих выборок с тремя вариантами учета площадного распределения ППС для каждой, а также аномалии Буге с постоянной плотностью  $1.50 \text{ г/см}^3$ , принятой за истинную плотность непосредственными исполнителями полевых гравиметрических работ и с постоянной плотностью  $1.46 \text{ г/см}^3$ , являющейся средней для стандартной выборки.

Результаты вычислений приведены на рис. 7. Варианты корреляций на рисунке распределены по возрастанию стандартного отклонения, рассчитанного для соответствующего варианта.

Оба варианта корреляции (и для стандартной, и для расширенной выборки) в случае аппроксимации базового уровня регионального тренда рельефа поверхностью 2-го порядка оказались хуже вариантов аппроксимации его константой на уровне альтитуды нижней точки рельефа. Поэтому указанные варианты корреляции на рис. 7 не представлены.

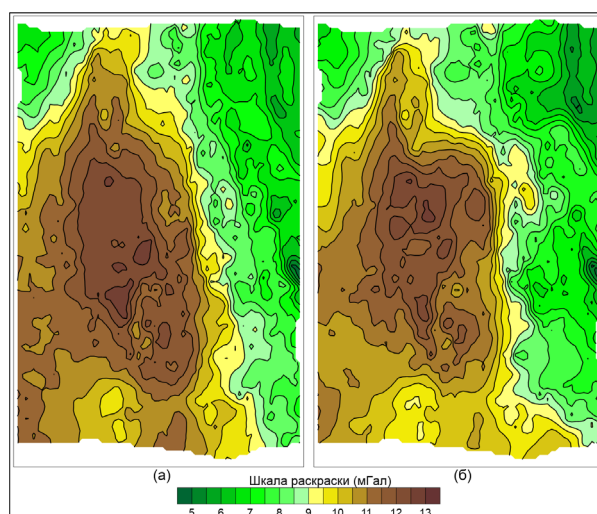


**Рис. 7.** Корреляция рельефа дневной поверхности с аномалиями Буге в скользящем окне переменного размера при различных вариантах ППС. 1, 2 – переменная ППС для расширенной выборки от дневной поверхности до глубины 142 м (1), до уровня моря (2); 3, 4 – переменная ППС для стандартной выборки от дневной поверхности до глубины 142 м (3), до уровня моря (4); 5 – постоянная ППС  $1.50 \text{ г/см}^3$ ; 6 – постоянная ППС  $1.46 \text{ г/см}^3$

Выполненное сравнение наглядно демонстрирует, что с рельефом дневной поверхности менее всего коррелируют аномалии Буге, рассчитанные с переменной плотностью.

промежуточного слоя, взятой в интервале от дневной поверхности до уровня нижней точки локального рельефа при расширенном варианте выборки (см. рис. 8(б)). В этом варианте редукции коэффициент корреляции аномалий с рельефом уменьшается в сравнении с другими вариантами при любом из использованных размеров окна.

На рис. 8 приведены карта аномалий в редукции Буге, полученная традиционным способом (а), и карта с переменной плотностью промежуточного слоя, аномалии которой менее всего коррелируют с рельефом (б).



**Рис. 8.** Карты аномалий силы тяжести в редукции Буге: с постоянной ППС  $1.50 \text{ г/см}^3$  (а), с переменной ППС выше базовой отметки 142 м (б)

Различия в аномалиях очевидны и весьма существенны. При общем диапазоне изменений поля в пределах участка около  $8.5 \text{ мГал}$  диапазон локальной разности полей этих карт превышает  $3.5 \text{ мГал}$ .

Для сравнения информативности обоих вариантов карт был выполнен визуальный анализ проявленности в аномальных полях известных геологических объектов. Для этого обе карты были подвергнуты одинаковой процедуре обработки с выделением локальной составляющей средствами пакета КОСКАД 3-D.

На рис. 9 приведены карты локальных аномалий Буге с постоянной (а) и переменной (б) плотностью промежуточного слоя. На них красным цветом показаны контуры двух локальных структур по ОГ П<sup>к</sup> и широтный линеамент, разграничивающий блоки с

разными системами деформаций на данной территории и частично совпадающий с северной границей Яринского атолла.

Очевиден более контрастный характер локальных аномалий карты варианта (б) с переменной ППС при одновременном уменьшении выраженности субмеридиональных цепочек положительных аномалий, совпадающих с поднятиями рельефа дневной поверхности, в восточной половине площади. Амплитуда положительных аномалий, отвечающих контурам локальных структур по ОГ II<sup>к</sup> на карте варианта (б), до полутора раз больше, чем в случае варианта (а). Широкий линеамент на карте с переменной ППС также проявлен более чётко.

Даже такой весьма поверхностный визуальный анализ информативности двух вариантов карт позволяет сделать вывод, что более эффективным и предпочтительным будет использование для геологической интерпретации карты аномалий Буге с переменной плотностью промежуточного слоя, определённой по расширенной выборке.

Относительно полученной в результате настоящей работы карты площадного распределения плотности верхней части разреза

(см. рис. 6 (б)) можно отметить, что она, не имея визуального сходства с геологической картой, отражает некоторые существенные особенности геологического строения участка. Так, пониженные плотности, закартированные на трети участка вдоль западной его границы, отвечают зоне распространения пермских терригенных отложений артинского и кунгурского ярусов в области автохтона передового Всеволодо-Вильвенского надвига. Повышенные плотности в восточной половине участка согласуются с выходом на дневную поверхность в зоне аллохтона пород жесткого карбонатного комплекса.

Указанная область повышенных значений ППС в северной половине участка рассечена «залювом» пониженных плотностей субширотного простирания, не согласующихся, на первый взгляд, с геологической картой (см. рис. 6 (б)). Но именно эта плотностная особенность верхней части геологического разреза, после использовании её в качестве одного из элементов переменной ППС для редуцирования, увеличивает контраст проявления широтного линеамента и амплитуду локальных аномалий от поисковых объектов (см. рис. 9 (б)).

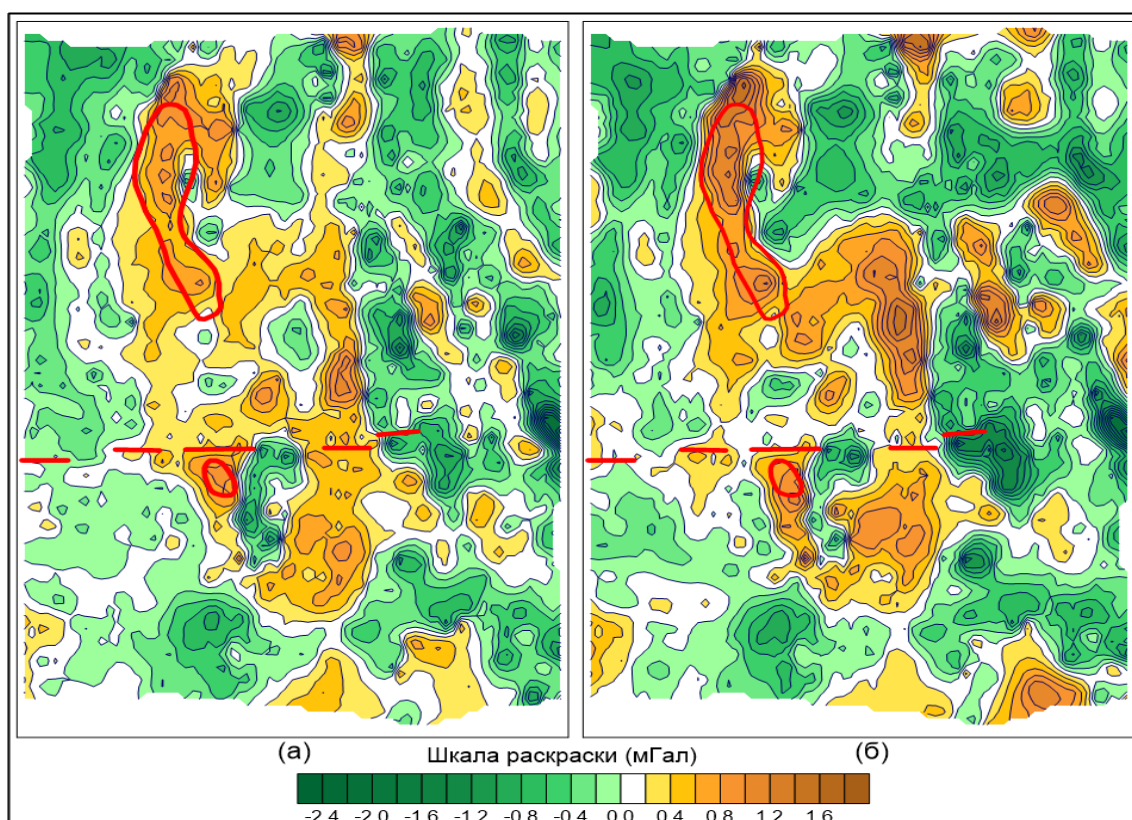


Рис. 9. Карты локальных аномалий при с постоянной ППС  $1.50\text{г/см}^3$  (а), при переменной ППС (б)



Такая связь глубинного строения с особенностями плотностного строения самой верхней части разреза, вероятнее всего, неслучайна и требует дополнительного изучения и анализа, что выходит за рамки данной работы.

## Выводы

Представленные в настоящей статье методика и результаты построения карты площадного распределения плотности промежуточного слоя и вычисления на ее основе карты аномалий Буге с учетом результатов ранее выполненных работ (Шелихов, 2022), позволяют сделать два важных вывода.

Во-первых, аномалии Буге в описанном выше варианте редуцирования менее всего искажены помехами, связанными с неадекватным учетом ППС, и именно они должны быть использованы для содержательной геологической интерпретации результатов высокоточных гравиметрических работ.

Во-вторых, полученное весьма контрастное распределение плотностей верхней части геологического разреза (рис. 6 (б)) является истинным, геологически обусловленным и отражает особенности строения изучаемого участка.

По сути, описанная выше и примененная на материалах Губахинского участка методика вычисления плотностей промежуточного слоя и использование этих плотностей для вычисления аномалий силы тяжести в редукации Буге позволили получить новую геологическую информацию в виде площадного

распределения плотностей верхней, рельефообразующей части геологического разреза. Очень важно отметить, что описанный методика позволяет вычислять плотности на основе прямых гравиметрических наблюдений, а посредством анализа корреляции аномалий Буге с рельефом дневной поверхности удается выбрать из нескольких вариантов распределения плотностей наиболее достоверный, при котором корреляция аномалий с рельефом минимальна.

## Библиографический список

*Березкин В.М.* Учет рельефа местности и промежуточного слоя в гравиразведке // М. Недра, 1967. 66, 70 с.

*Вайк Р.* Поправки Буге с переменной поверхностной плотностью // Геофизика. 1956. Т. 4. С. 1004–1020. doi: 10.1190/1.1438292

*Грант Ф.С., Эльсахарт А.Ф.* Редукция Буге с использованием переменной плотности // Геофизика. 1962. Т. 5. С. 616–626. doi: 10.1190/1.1439071

*Нетлтон Л.Л.* Определение плотности для редукации гравиметрических наблюдений // Геофизика. 1939. Т. 4. С. 176–183. doi: 10.1190/1.1437088

*Шелихов А.П.* Использование статистического подхода для вычисления аномалий Буге с переменной плотностью промежуточного слоя // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 48-й сессии Международного научного семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова. СПб., 2022. С. 271–274.

# Determination of the Variable Density of the Intermediate Layer within the Gubakha Area (Permskiy Krai)

**A.P. Shelikhov**

Tyumen Industrial University

38 Volodarskiy Str., Tyumen 625000, Russia

E-mail: shelihovap@tyuiu.ru

Because of the improvement of instrumentation and technology progress in the conducting of gravity survey, there is a continuous increase in the accuracy of calculating the gravity Bouguer anomalies. At the same time, due to inadequate assessment of the intermediate layer density taken as a constant for reduction, the calculated anomalies may contain significant relative error. The article describes the experience of using the three-point formula of V.M. Berezkin to build a map of the areal distribution of the density of the intermediate layer and

calculating, on its basis, anomalies in the Bouguer reduction according to high-precision gravimetric surveys at the Gubakha area.

Keywords: *high-precision gravity survey; Berezkin formula; statistical approach; variable density; intermediate layer.*

## References

*Berezkin V.M.* 1967. Uchet relyefa mestnosti i promezhutochnogo sloya v gravirazvedke [Accounting for the terrain and intermediate layer in gravity exploration]. Moskva, Nedra. p. 66, 70. (in Russian)

*Vajk R.* 1956. Bouguer corrections with varying surface density. *Geophysics*. 4:1004–1020. doi: 10.1190/1.1438292

*Grant F.S, Elsharty A.F.* 1962. Bouguer gravity correction using a variable density. *Geophysics*. 5:616–626. doi: 10.1190/1.1439071

*Nettleton L.L.* 1939. Determination of density for

the reduction of gravimeter observations. *Geophysics*. 4:176–183. doi: 10.1190/1.1437088

*Shelikhov A.P.* 2022. Ispolzovaniye statisticheskogo podkhoda dlya vychisleniya anomalii Buge s peremennoy plotnostyu promezhutochnogo sloya [Using a statistical approach to calculate Bouguer anomalies with variable surface density]. In: *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii geofizicheskikh poley. Materialy 48-y sessii Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara im. D.G. Uspenskogo – V.N. Strakhova.* SPb., pp. 271–274. (in Russian)