

**Рис. 3.** Относительные спектрограммы, характеризующие усиление горизонтальных колебаний для горизонтальных колебаний

*Работа выполнена в рамках хозяйственного договора с ООО «Гипс Кнауф Новомосковск».*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богацкий В.Ф., Фридман А.Г. Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов. – М.: Недра, 1982. – 162 с.: ил.
2. Верховланцев А.В., Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю., Шкурко А.В. Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере «Шахтау» // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 2. – С. 59-69. DOI: [10.15372/FTPRI20190207](https://doi.org/10.15372/FTPRI20190207).
3. ГОСТ 34081-2017. Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний. – Дата введения 2017-11-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 19 с.
4. ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. – Дата введения 2008-10-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 32 с.
5. Методика оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений. – М.: ВНИИ ГОЧС МЧС России, 2002. –
6. РБ Г-05-039-96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия: Введено в действие 1.08.1997 г. – М.: НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России, 2000. –
7. Сапожников А.И. Особенности колебаний зданий и сооружений при динамических воздействиях различной природы // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2015. – № 1 (192). – С. 27-32.
8. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах». – М.: Норматика, 2016. – 172 с.

УДК 550.83.016

DOI:10.7242/echo.2020.2.10

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В МЕТОДЕ ИСТОКООБРАЗНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ГЕОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

А.С. Долгаль

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Приводятся результаты вычислительных экспериментов по аппроксимации гравитационного поля системами разноглубинных эквивалентных источников. Даны характеристики двух наборов матриц коэффициентов систем линейных алгебраических уравнений, использующихся для определения значений аппроксимирующих масс. Один набор отвечает горному рельефу местности, второй – горизон-

тальной поверхности наблюдений. Выполнены вычисления норм и чисел обусловленности матриц путем их обращения методом Шульца. Предложены критерии «слабого» и «сильного» влияния рельефа в рассматриваемом методе. Анализ полученных результатов свидетельствует о целесообразности построения многоуровневых аппроксимационных конструкций.

**Ключевые слова:** гравиразведка, истокообразная аппроксимация, матрица коэффициентов, норма, обусловленность.

## Введение

Метод истокообразной аппроксимации применяется при обработке и интерпретации геопотенциальных полей и построении аналитических моделей рельефа земной поверхности. Наиболее широко он используется с целью трансформации геопотенциальных полей, т.е. для выделения содержащейся в интерпретируемом поле информации о геологических объектах определенного типа (например – о локальных приповерхностных неоднородностях или о глубинных границах раздела физических свойств горных пород). Неоспоримым преимуществом метода является возможность эффективной работы с данными, заданными по нерегулярной сети точек; на криволинейной поверхности измерений  $z = f(x, y)$ ; осложненными помехами, нарушающими гармонический характер поля [1, 2, 5, 7].

Суть метода – приближение (аппроксимация) наблюдаемых дискретных значений физического поля  $U$ , обусловленного совокупностью реальных геологических объектов с неизвестными параметрами, полем  $U^*$  сеточного распределения  $\Omega$  элементарных источников:  $\|U - U^*\| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – малая величина, сопоставимая с точностью измерений поля  $U$ . Наиболее технологически просто для этого использовать наборы источников  $\Omega$  с фиксированными геометрическими параметрами, в этом случае задача сводится к лишь определению физических параметров путем решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). В общем виде СЛАУ выглядит следующим образом:

$$Ax = u, \quad (1)$$

где  $u$  – вектор наблюдаемых значений гравитационного (магнитного) поля,  $x$  – вектор неизвестных значений эффективной плотности (намагниченности) элементарных источников,  $A$  – матрица коэффициентов, представляющих собой аномальный эффект каждого источника, входящего в  $\Omega$ , при  $x = 1$ . В большинстве практических случаев порядок СЛАУ составляет  $10^4$ – $10^7$ , что влечет за собой необходимость использования приближенных итерационных методов для ее решения [3].

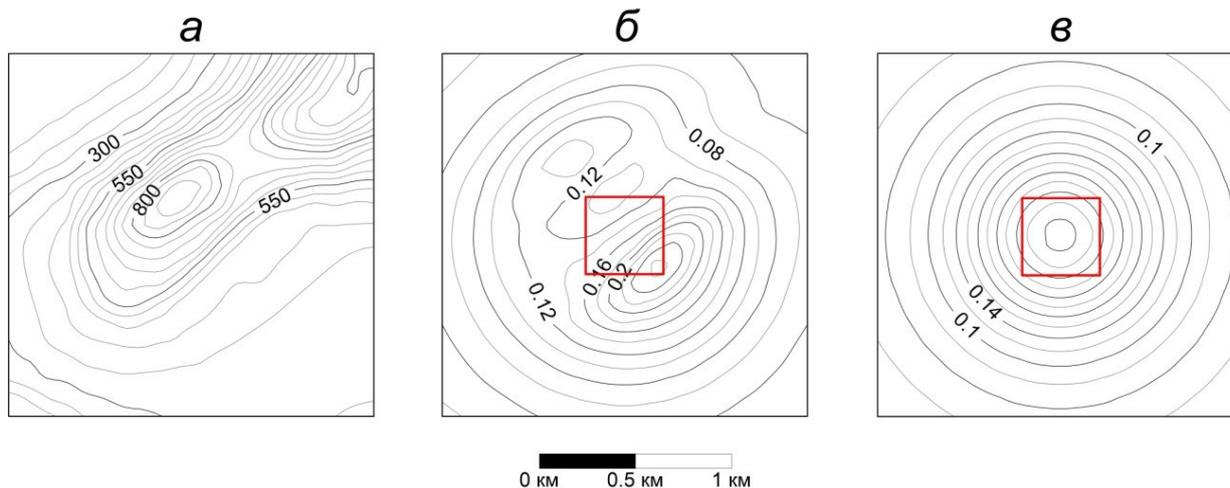
## Характеристика исходных данных

В данной статье будут представлены экспериментальные результаты оценки влияния формы поверхности измерений  $z = f(x, y)$  на решение СЛАУ (1), позволяющие наметить пути дальнейшего совершенствования метода истокообразной аппроксимации. Без ограничения общности выводов ограничимся рассмотрением аномалий силы тяжести  $V_z$ , зафиксированных на земной поверхности, характеризующейся некоторым типом рельефа. Главными внешними признаками рельефа являются характер его форм, высота их над уровнем моря и относительная высота или глубина расчленения. По этим показателям выделяются следующие типы рельефа: равнинный, холмистый и горный. Рассмотрим два предельных случая для детальной съемки на площади размером  $3,61 \text{ км}^2$ , используя решение прямой задачи гравиразведки.

*Случай 1:* горный рельеф с перепадами высот  $\Delta$  от 100 до 1077 м, на поверхности которого в узлах сети  $100 \times 100$  м заданы значения поля  $V_z$ , обусловленного телом кубиче-

ской формы. Размеры тела  $400 \times 400 \times 400$  м, координаты центра тяжести  $x_{ц} = y_{ц} = 950$  м,  $z_{ц} = 200$  м, эффективная плотность  $\sigma = 0.3$  г/см<sup>3</sup> (рис 1.а, б).

Случай 2: поле  $V_z$  задано по той же сети на плоскости  $z = 0$ , источник поля характеризуется аналогичными параметрами, за исключением того, что  $z_{ц} = 640$  м. Выбранная глубина  $z_{ц}$  отвечает среднему значению относительной глубины аномалиеобразующего куба в случае 1 (рис. 1.в).



**Рис. 1.** Модельный пример: карта изогипс рельефа земной поверхности (а) и карты изоаномал силы тяжести  $V_z$  на земной поверхности (б), на горизонтальной плоскости  $z = 0$  (в).

Примечание: красный контур – проекция аномалиеобразующего куба

Для аппроксимации будем использовать схему размещения эквивалентных источников, предложенную В.И. Ароновым: под каждой точкой задания поля поместим шар (точечную массу) на относительной глубине  $h = const$  от поверхности измерений  $S$  [2]. В этом случае коэффициенты матрицы  $\mathbf{A}$  будут определяться следующим образом:

$$a = \frac{\zeta - z}{\left[ \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + (\zeta - z)^2} \right]^3} \quad (2),$$

где  $(\xi, \eta, \zeta)$  – координаты центра шара,  $(x, y, z)$  – координаты точки расчета поля  $V_z$ . Таким образом, неизвестная величина  $x = 4/3\pi R^3 \sigma G$ , где  $R$  – радиус шара,  $\sigma$  – его эффективная плотность,  $G$  – гравитационная постоянная, которую в дальнейшем будем называть «массой», будет выражаться в условных единицах. Это позволяет избежать выполнения операции умножения при многократном вычислении коэффициентов  $\{a_{ij}\}$ , без изменения физического смысла задачи и сохранении размерности правой части СЛАУ (1).

### Матрицы коэффициентов в системах уравнений

Размерность матрицы значений поля  $V_z$  в представленных модельных примерах составляет 20 строк, 20 столбцов. Соответственно, размерность матрицы  $\mathbf{A}$  (1), будет составлять 400 строк, 400 столбцов. Глубины источников  $h = 100$  м, 150 м, 200 м, 250 м, 300 м, 500 м (от 1 до 5 в шагах сети наблюдений). В вычислительном эксперименте будут участвовать  $6 \times 2 = 12$  невырожденных квадратных матриц коэффициентов  $\mathbf{A}$ , для которых рассчитываются следующие нормы:

$$\|\mathbf{A}\|_{max} = \max_{i,j} |a_{ij}|, \quad (3)$$

$$\|\mathbf{A}\|_m = \max_i (\sum_j |a_{ij}|), \quad (4)$$

$$\|\mathbf{A}\|_l = \max_j (\sum_i |a_{ij}|), \quad (5)$$

$$\|\mathbf{A}\|_f = \sqrt{\sum_i \sum_j (a_{ij})^2}, \quad (6)$$

а также след матрицы  $Tr \mathbf{A} = \sum_{i=1}^{400} a_{ii}$ . Результаты вычислений представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Характеристики матриц коэффициентов А СЛАУ (случай 1)

Параметры матрицы А	Глубина $h$ эквивалентных источников, в шагах сети					
	1	1.5	2	2.5	3	5
$\ \mathbf{A}\ _{max}$	100.00	44.44	38.48	38.47	32.16	14.72
$\ \mathbf{A}\ _m$	636.00	571.97	538.06	488.89	460.16	373.10
$\ \mathbf{A}\ _l$	624.44	583.70	515.76	472.31	443.71	339.61
$\ \mathbf{A}\ _f$	2481.38	1583.77	1214.61	969.33	797.44	455.66
$tr \mathbf{A}$	40000.00	17777.78	10000.00	6400.00	4444.44	1600.00

Таблица 2

Характеристики матриц коэффициентов А СЛАУ (случай 2)

Параметры матрицы А	Глубина $h$ эквивалентных источников, в шагах сети					
	1	1.5	2	2.5	3	5
$\ \mathbf{A}\ _{max}$	100.00	44.44	25.00	16.00	11.11	4.00
$\ \mathbf{A}\ _m$	575.62	542.42	514.27	487.08	460.71	365.31
$\ \mathbf{A}\ _l$	575.62	542.42	514.27	487.08	460.71	365.31
$\ \mathbf{A}\ _f$	2598.98	1623.18	1195.64	943.17	775.29	440.18
$tr \mathbf{A}$	40000.00	17777.78	10000.00	6400.00	4444.44	1600.00

Как очевидно, существенных отличий норм (3)–(6) для разных случаев не наблюдается. Все значения  $\|\mathbf{A}\|_{max}$ ,  $\|\mathbf{A}\|_m$ ,  $\|\mathbf{A}\|_l$ ,  $\|\mathbf{A}\|_f$  и  $tr \mathbf{A}$  монотонно уменьшаются с ростом величины  $h$ , что связано с затуханием поля по мере увеличения глубины его источников. Характерной особенностью матрицы коэффициентов СЛАУ для случая 1 является

наличие отрицательных значений  $a_{ij}$  и аномально высоких значений нормы (3), превышающих величину гравитационной аномалии над центром источника в 1,5–3,5 раза при  $h \geq 2$ . Это обусловлено тем, что в условиях резкорасчлененного рельефа часть источников располагается выше точек расчета поля, а горизонтальные расстояния «источник – точка расчета» в ряде случаев могут быть ниже вертикальных.

### Оценка обусловленности с использованием метода Шульца

Обусловленность матрицы коэффициентов СЛАУ является важнейшей характеристикой, определяющей сложность процесса ее решения и точность полученных результатов [3, 4]. Число обусловленности ( $H$ -число Тодда) матрицы  $\mathbf{A}$ :

$$\text{cond } \mathbf{A} = \nu_A = \|\mathbf{A}^{-1}\| \|\mathbf{A}\| \quad (7)$$

определяет влияние неточностей в задании исходных данных на окончательный результат [10]. Напомним, что минимально возможная величина  $\nu = 1$ , СЛАУ с высокими значениями  $\nu \gg 1$  называют плохо обусловленными.

Для обращения матрицы  $\mathbf{A}$  использовался итерационный метод Шульца второго порядка [8]. Суть его заключается в поиске обратной матрицы  $\mathbf{A}^{-1}$  построением ее последовательных приближений  $\mathbf{U}^{(0)}, \mathbf{U}^{(1)}, \dots, \mathbf{U}^{(k)}, \dots$  с контролем невязки по величине  $\|\Psi^k\|$ , где  $\Psi^k = \mathbf{E} - \mathbf{A}\mathbf{U}^{(k)}$ . В качестве начального приближения  $\mathbf{U}^{(0)}$  автором использовалась транспонированная матрица  $\mathbf{A}^T$ , умноженная на число  $\alpha = 10^{-7}$ :  $\mathbf{U}^{(0)} = \alpha \mathbf{A}^T$ . Итерационный процесс выглядит следующим образом:

$$\mathbf{U}^{(k+1)} = \mathbf{U}^{(k)} \times \{\mathbf{E} + \Psi^k + [\Psi^k]^2\} \quad (8)$$

Для данного класса задач метод Шульца оказался работоспособным даже при  $\|\Psi^0\| > 1$  (рис. 2).

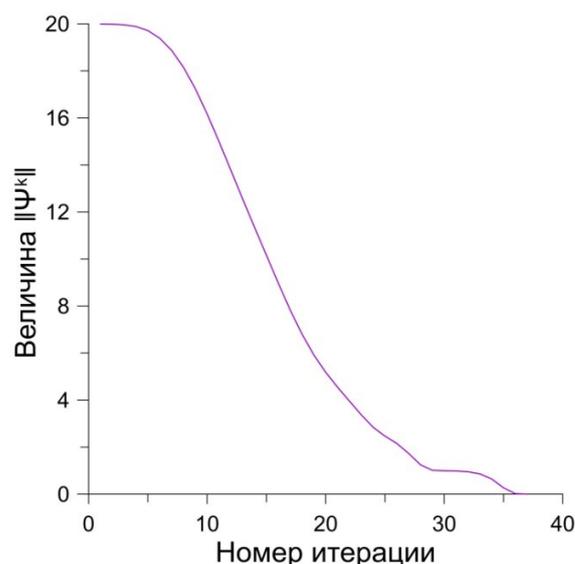


Рис. 2. Итерационный процесс обращения матрицы  $\mathbf{A}$  при  $h = 250$  м (случай 1)

Критерием завершения процесса являлось малое значение нормы Фробениуса невязки  $\|\Psi^k\|_f \leq 0.001$ . В табл. 3, 4 приведены характеристики обратных матриц  $\mathbf{A}^{-1}$  для случаев 1 и 2.

Таблица 3

Характеристики обратных матриц коэффициентов  $A^{-1}$  СЛАУ (случай 1)

Параметры матрицы $A^{-1}$	Глубина $h$ эквивалентных источников, в шагах сети					
	1	1.5	2	2.5	3	5
$\ A^{-1}\ _{max}$	0.015	2.47	1771.69	6330.64	352.34	8152.57
$\ A^{-1}\ _m$	0.043	27.13	18955.71	89658.55	15604.55	271272.96
$\ A^{-1}\ _l$	0.046	58.23	37137.96	229747.22	13731.66	328489.17
$\ A^{-1}\ _f$	0.308	21.18	10510.14	35753.84	4868.46	118286.11
$tr A^{-1}$	5.422	25.94	59.25	-347.02	302.14	3281.07

Таблица 4

Характеристики обратных матриц коэффициентов  $A^{-1}$  СЛАУ (случай 2)

Параметры матрицы $A^{-1}$	Глубина $h$ эквивалентных источников, в шагах сети					
	1	1.5	2	2.5	3	5
$\ A^{-1}\ _{max}$	0.015	0.079	0.44	9.49	10.05	9788.08
$\ A^{-1}\ _m$	0.035	0.327	4.03	708.12	481.12	484444.66
$\ A^{-1}\ _l$	0.035	0.327	4.03	708.12	481.12	484444.66
$\ A^{-1}\ _f$	0.338	2.034	13.39	544.35	420.57	455125.00
$tr A^{-1}$	6.010	30.322	161.92	1107.50	1540.19	1126608.83

### Анализ полученных результатов

Как очевидно, обратные матрицы  $A^{-1}$  в случае горного рельефа и плоской поверхности наблюдений являются неустойчивыми и существенно различаются между собой. Полученные оценки сверху  $\nu$  обусловленности коэффициентов соответствующих СЛАУ (7) достигают  $\sim 5 \times 10^7$  и  $\sim 20 \times 10^7$  и не зависят от метода их решения (рис. 3).

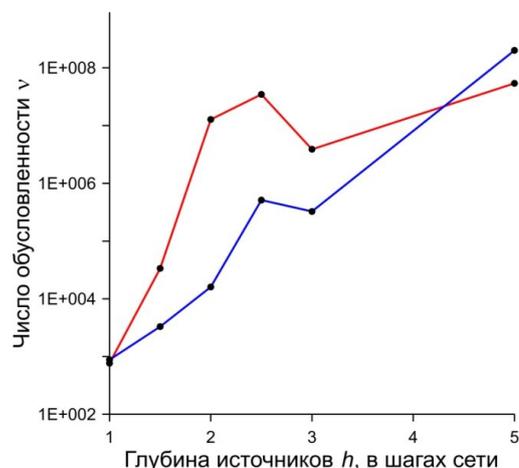


Рис. 3. Числа обусловленности  $\nu$  матрицы  $A$  для разных поверхностей задания гравитационного поля: красная линия – горный рельеф (случай 1); синяя линия – горизонтальная плоскость (случай 2)

Весьма неожиданным результатом выполненных расчетов явилось отсутствие монотонной зависимости между глубинами  $h$  источников и значениями  $\nu$ : при  $h = 2-2.5$  в случае 1 обусловленность СЛАУ резко ухудшается.

Приблизительные потери в точности решения достигают 3–8 значащих цифр, что однако, существенно ниже критической величины  $1/\varepsilon_0$ , где  $\varepsilon_0$  – машинный ноль (machine epsilon). В частности, для компьютера автора, на котором выполнялись все расчеты, экспериментально определено значение  $\varepsilon_0 \cong 1 \times 10^{-19}$ . В литературе имеются разные пороговые оценки чисел  $\nu_{\text{пор}}$ , определяющих хорошую и плохую обусловленность СЛАУ. Автор склонен разделить точку зрения о  $\nu_{\text{пор}} \cong 1000$ , согласно которой в данной ситуации только при  $h = 100$  м мы имеем дело с хорошо обусловленными СЛАУ.

Для решения всех СЛАУ вида (1) использовался итерационный метод релаксаций [4, 11] с постоянным параметром  $\tau = 0.25$ :

$$\mathbf{B} \frac{x^{i+1} - x^i}{\tau} + \mathbf{A}x^i = \mathbf{u} \quad (9)$$

В 1-м случае при выполнении 5–6 итераций погрешности результатов составили в евклидовой метрике  $F2 = (0.002-0.004)$  мГал, в метрике Чебышева  $FM = (0.009-0.017)$  мГал. Во 2-м случае при выполнении 4–5 итераций погрешность результатов в метрике  $F2 = (0.001-0.002)$  мГал, в метрике Чебышева  $FM = (0.002-0.009)$  мГал. Максимальные значения поля  $V_z - 0.265$  мГал и  $0.304$  мГал, соответственно. Отмечается устойчивое снижение показателей качества решения СЛАУ с ростом числа ее обусловленности  $\nu$ . Однако во всех случаях полученная точность  $F2$  решения не превышает 1–2% от максимальной амплитуды поля, что вполне достаточно для практики.

Располагая набором решений 12-и СЛАУ (1), можно рассчитать и сопоставить суммарные массы аппроксимационных конструкций  $M = \sum_{i=1}^{400} x_i$ . Ранее [6], в 2D-варианте для аномалий силы тяжести  $\Delta g$  было экспериментально установлено, что суммарные массы  $M$  погруженных на различные глубины  $1.5 \leq h \leq 12$  элементарных источников могут изменяться в пределах 1–2 порядков при сохранении малых значений  $F2$  (т.е. при высокой точности аппроксимации поля). Широкие границы проявления  $\varepsilon$ -эквивалентности, обусловленные конечными размерами области  $S$  задания поля и дискретностью измерений, порождают неоднозначность определения трансформант, описанную в работе А.В. Пугина [9].

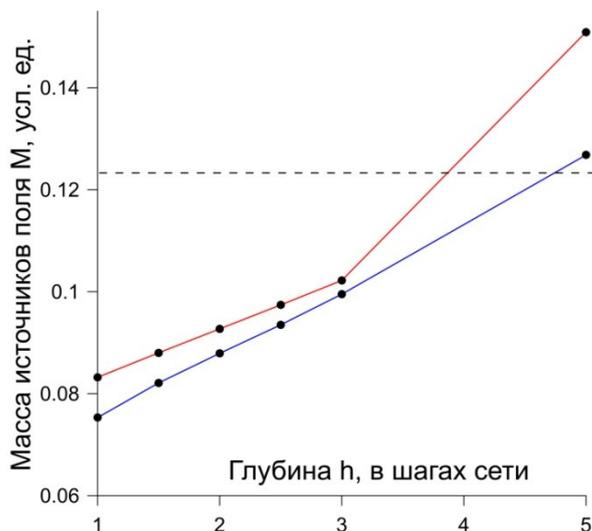
В рассматриваемых нами случаях, несмотря на наличие условий, близких к теоретической однозначности решения обратной задачи гравиразведки (теорема П.С. Новикова) и сравнительно небольшой диапазон изменения  $h$ , наблюдаются изменения  $M$  более чем в 1,5 раза (рис. 4). Причем наиболее существенные отличия  $M$  от истинной массы аномалиеобразующего тела отмечаются при сравнительно малых значениях  $\nu$ .

## Выводы

Полученные результаты приводят к следующим выводам:

При изменении глубин  $h$  источников, аппроксимирующих гравитационное поле, в интервале относительных глубин  $1 \leq h \leq 5$  обусловленность матриц коэффициентов СЛАУ ухудшается примерно в  $10^5$  раз, независимо от формы поверхности задания поля. Однако эта зависимость не является монотонной, значения  $\text{cond } \mathbf{A}$  для плоскости при  $1.5 \leq h \leq 3$  ниже в 10–100 раз, чем для криволинейной поверхности  $z = f(x, y)$ , т.е. горного рельефа.

Для метода истокообразной аппроксимации можно предложить определения «слабого» и «сильного» рельефа (которые также будут зависеть от сети наблюдений и глубин  $h$  эквивалентных источников). «Слабый» рельеф отвечает перепаду высот  $\Delta < h$  и порождает положительную матрицу  $\mathbf{A}: \{\forall a_{ij} > 0\}$ , предельным случаем которой является симметрическая матрица  $\mathbf{A}$  для горизонтальной плоскости  $z = 0$ . В случае «сильного» рельефа, при  $\Delta \geq h$ , диагональное преобладание матрицы коэффициентов СЛАУ может отсутствовать.



**Рис. 4.** Зависимость суммарной массы  $M$  аппроксимационной конструкции от глубины  $h$  источников поля: красная линия – горный рельеф (случай 1); синяя линия – горизонтальная плоскость (случай 2); черный пунктир – истинная масса аномалиеобразующего тела

1. Сравнительно небольшое изменение чисел обусловленности  $\nu$  отвечает равенству норм  $\|\mathbf{A}\|_{max}$  при  $h \leq 1.5$  для разных поверхностей наблюдений  $S$ . Предварительное вычисление и анализ матриц  $\mathbf{A}$  коэффициентов СЛАУ для реальной и плоской поверхностей  $S$  может использоваться при выборе важнейшего параметра аппроксимации – глубины  $h$  размещения эквивалентных источников.

2. Для сохранения приближенного соответствия суммарной величины аномалиеобразующих масс  $M$  при хорошей обусловленности СЛАУ  $\nu \leq 1000$  необходим переход к 2-х или 3-х уровневым аппроксимационным конструкциям (с искусственным разрежением сети наблюдений и декомпозицией задачи).

3. В дальнейшем представляется целесообразным для оценок  $cond \mathbf{A}$  использовать спектральные характеристики, т.к. обращение матриц такого типа требует больших затрат времени и вычислительных ресурсов, чем непосредственное решение СЛАУ.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00654 А.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Balk P.I., Dolgal A.S., Pugin A.V., Michurin A.V., Simanov A.A., Sharkhimullin A.F. Effective algorithms for sourcewise approximation of geopotential fields // Izvestya Physics of the Solid Earth. – 2016. – V. 52, № 6. – P. 896-911.
2. Аронов В.И. Методы построения карт геолого-геофизических признаков и геометризация залежей нефти и газа на ЭВМ. – М.: Недра, 1990. – 301 с.
3. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – 8-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000. – 622 с.: ил.
4. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике. Справочник геофизика / под ред. В.И. Дмитриева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Недра, 1990. – 498 с.

5. Гравиразведка: справ. геофизика / под ред. Е.А. Мудрецово́й, К.Е. Веселова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 607 с.: ил.
6. Долгаль А.С. Декомпозиция решения обратной задачи гравиразведки рудного типа монтажным методом // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. – 2019. – № 1 (41). – С. 25-36. – DOI: 10.31431/1816-5524-2019-1-41-25-36.
7. Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н., Пугин А.В. Алгоритмы аппроксимации геопотенциальных полей истокообразными функциями // Геофизика. – 2016. – № 5. – С. 4-10.
8. Математический форум Math Help Planet [Электронный ресурс] – URL : <http://mathhelpplanet.com/static.php?p=iteratsionnyi-metod-shultsa-nakhozheniya-obratnoi-matritsy> (Дата обращения 2.04.2020 г.)
9. Пугин А.В. Истокообразные аппроксимации геопотенциальных полей. От теории к практике // Геофизические исследования. – 2018. – Т.19, № 4. – С. 16-30. DOI:10.21455/gr2018.4-2.
10. Фаддеев Д.К. Об обусловленности матриц // Труды математического института АН СССР. – 1959. – Т. 53. – С. 387–391.
11. Форсайт Д., Молер К. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений: пер. с англ. – М.: Мир, 1969. – 166 с.: ил.

УДК 550.834.05

DOI:10.7242/echo.2020.2.11

## ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ ЗОН ВЫКЛИНИВАНИЯ ПЛАСТОВ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ СОЛЯНЫХ РУДНИКОВ КОМПЛЕКСОМ ШАХТНОЙ И НАЗЕМНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

И.А. Санфи́ров

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Латеральная изменчивость толщин водоупорных пластов на месторождения водорастворимых полезных ископаемых – обычное геологическое явление. В отдельных случаях оно может принимать и критические формы вплоть до полного выклинивания, например в пределах разного рода положительных структур. Картирование границ выклинивания данных пластов, определяющих возможность ведения горных работ, предлагается на основе результатов сейсморазведочных исследований, как с поверхности, так и во внутренних точках среды. В качестве информационного обеспечения формирования интерпретационных заключений в дополнение к волновым картинам в первую очередь рассматриваются различные динамические характеристики разноразмерных волновых полей: амплитуды и двумерные амплитудные спектры. Привлекаются также данные о распределении эффективных скоростей в пределах плоскости профиля.

**Ключевые слова:** сейсморазведка, двумерные спектры, зона выклинивания, скоростная характеристика, интерференция, Верхнекамское месторождение.

Для Верхнекамского месторождения известен ряд поднятий, осложненных куполами, в пределах которых выклиниваются продуктивные и вмещающие их отложения [1]. Очевидно, что при уменьшении толщин пластов, защищающих калийную залежь от воздействия водоносных горизонтов надсоляных отложений, ведение горных работ становится невозможно. В этой связи прогноз пространственных координат «нулевой» изопахиты соляных пластов, входящих в состав водозащитной толщи (ВЗТ), крайне важен для обеспечения безопасности ведения горных работ.

Задача определения границ зон выклинивания отдельных литологических комплексов хорошо известна из практики сейсморазведочных исследований по методике многократных перекрытий [2], при поисках и разведке месторождений углеводородов. Актуальность изучения подобных объектов связана с прогнозом неструктурных ловушек [3]. Очевидно, что прямое решение за счет повышения частотного диапазона регистрируемого волнового поля, объективно ограничено технологическими возможностями реализуемых систем наблюдений.

Целесообразность разработки специализированных методических приемов, связанных с усложнениями полевого процесса, также не всегда очевидна. Перспективы дета-