

# ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

УДК 550.83

DOI:10.7242/echo.2023.4.8

## ОБ ОБРАБОТКЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ЗАПИСЕЙ ГРАВИМЕТРА AUTOGRAV

И.В. Геник

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Опыт использования долговременных записей гравитационного поля имеет длительную историю, но только в последние 20-25 лет использование гравиметрических данных, охватывающих длинные временные интервалы, стало достаточно массовым. Этому способствовали появление компьютеризированных гравиметров и специальные спутниковые миссии по наблюдению гравитационного поля.

В статье выполняется анализ подходов к интерпретации длительных наблюдений гравитационного поля и описывается опыт первоначального анализа данных гравитационного поля, полученных при долговременных наблюдениях в феврале-мае 2017 г. гравиметром Autograv.

Традиционные приемы интерпретации длительных регистраций гравитационного поля предусматривают использование небольшого числа легко реализуемых интерпретационных методов: сопоставление графиков, осреднение и вычисление локальных аномалий, Фурье-анализ, корреляционно-регрессионный анализ.

Для исследования исходных данных был создан первый вариант программы анализа временных рядов, включающий: ввод данных, контроль, визуализацию, вычисление описательной статистики, удаление тренда, сглаживание в скользящем окне, спектральный анализ, расчет автокорреляционной функции и доверительных интервалов. Приложение было разработано на языке программирования Python с использованием математических и статистических библиотек этого языка, что позволило воспроизвести имеющиеся подходы к интерпретации долговременных наблюдений гравитационного поля, а также сделать возможным в дальнейшем расширение спектра используемых методов за счет новых и более детальных подходов. В статье приведены некоторые из результатов работы программы.

Дальнейшее развитие программы связано как с использованием всех возможностей языка программирования (хранение в базе данных временных рядов и результатов, что обеспечивает удобство манипуляции с ними; создание клиент-серверного варианта приложения), имеющихся библиотек (построение регрессионных зависимостей; статическое оценивание форм распределений различных данных; новые интерфейсные библиотеки и др.), так и с параллельной обработкой нескольких наборов исходных данных.

**Ключевые слова:** геофизика, гравиразведка, гравиметр, мониторинг, временные ряды, интерпретация, программное обеспечение.

### Введение

В настоящее время можно выделить следующие основные направления, связанные с исследованием долговременных записей гравиметров.

Первое направление включает спутниковые исследования гравитационного поля Земли [17], а также наземные долговременные абсолютные наблюдения, связанные с задачами геодезии и спутниковыми системами навигации [15]. Спутниковые миссии регистрировали временные вариации гравитационного поля для изучения перемещений масс над и под поверхностью Земли: GRACE – изменений массы ледников (вследствие вариаций климата), а также мантийных процессов [16], GOCE – океанских течений [19], CHAMP – атмосферы [18].

Второе направление связано с геодинамическими исследованиями регионального и локального масштабов на геодинамических полигонах для изучения: землетрясений [5], включая, предвестники [2]; вертикальных движений земной коры [9]; зоны перехода суша-море [7]; влияния уровня грунтовых вод [10]; гравитационного поля во время солнечных затмений [13] и др.

Третье направление включает гравиметрический мониторинг месторождений полезных ископаемых. В России это в первую очередь это касается газовых и газоконденсатных месторождений [8, 12], так как имеется значимый гравитационный эффект после замещения газа и газоконденсата водой.

Четвертое направление, относительно новое, связано с длительными одновременными измерениями современными полевыми гравиметрами (Scintrex CG-5 Autograv), расположенными в удаленных друг от друга пунктах наблюдения [3, 4, 11, 14]. В ходе таких наблюдений зафиксированы случаи синхронного повышения интенсивности микросейсмических шумов.

Гравиметры фирмы Scintrex имеют следующие основные характеристики: смещение нуля-пункта за 24 часа составляет не более 0.02 мГал; пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений разности значений ускорения свободного падения в рабочем диапазоне  $\pm 5$  мкГал. При этом характерные гравиметрические аномалии различных объектов и процессов имеют следующие порядки величин и характерные размеры. Аномалии крупных нефтяных месторождений порядка 1 мГал; приливы дают аномалии порядка 0.1 мГал, максимальный эффект лунно-солнечных возмущений около 0.24 мГал; поле около больших зданий и сооружений изменяется около 0.01 мГал; на широте  $50^\circ$  размах суточных изменений гравитационного поля силы тяжести составляет примерно 0.15 мГал; на геодинамических полигонах годовые неприливные изменения силы тяжести порядка сотых долей мГал.

В статье для последнего из указанных направлений рассматриваются вопросы начальной обработки данных полевых гравиметров, охватывающих длинные временные интервалы.

### **Методы и подходы**

Рассмотрим применяемые разными авторами методы обработки долговременных записей гравиметров. Одним из первых приемов обработки данных является вычисление разностных аномалий между экспериментальными данными и принятой моделью [2, 4, 17], при этом в модель могут вноситься поправки за влияние атмосферных, гидрологических и иных факторов [5]. Следующим распространенным методом является построение трендов, зачастую линейных [5], поскольку объем априорной информации ограничен, не давая оснований строить более сложные модели. Осреднение в скользящем окне – еще один распространенный метод [2, 14]. Может выполняться простое сопоставление графиков [2, 3, 14], дополняемое в ряде случаев построением корреляционных матриц [14] или диаграмм [7]. Более углубленная обработка может включать разделение поля на компоненты с разной частотой для анализа спектра исследуемой величины [1, 7]. Применяются иногда и более продвинутые методы, например [16], метод главных компонент для многомерных временных рядов – статистический метод, используемый для уменьшения числа степеней свободы задачи, преобразующий набор коррелированных между собой переменных в набор некоррелированных переменных посредством ортогонального преобразования.

Перечисленные выше методы характерны, пожалуй, для большинства подходов к обработке долговременных записей гравитационного поля. Таким образом, базовый набор методов для обработки долговременных временных рядов гравитационного поля должен включать: осреднение, линейную и нелинейную аппроксимацию данных, спектральный и корреляционный анализ.

### **Результаты и обсуждение**

Отработка методик и создание начального варианта программы обработки и анализа временных рядов проводилась с использованием одной из записей гравитационного

поля, сданной гравиметром CG-5 Autograv. Параметры записи: измерения в период 18.02.2017–03.04.2017; 63382 отсчета; шаг измерений равен 57 с. В файле записи результатов измерений гравиметра имеется следующий набор данных: показания гравиметра (в мГал), вычисляемые как среднее арифметическое отсчетов за один цикл измерения на пункте; стандартное отклонение отсчетов (в мГал), автоматически взятых гравиметром с частотой 6 Гц в течение одного цикла измерений; максимальное отклонение кварцевой системы от вертикали вдоль осей X и Y в течение цикла измерений; температурная поправка (в мГал); величина поправки за лунно-солнечное притяжение (в мГал); длительность одного цикла измерений на пункте в секундах; число забракованных отсчетов в течение цикла измерений; время измерения и дата измерения.

Показания гравиметра изменялись от 6536.732 до 6549.080 мГал за счет смещения нуля пункта или, приблизительно, более 0.2 мГал в день. Количество забракованных отсчетов было равно нулю для каждого измерения.

Для стандартного отклонения получены следующие статистические характеристики (в мГал): минимум 0.007, максимум 1.782, среднее 0.035, медиана 0.031, стандартное отклонение выборки 0.0214, межквартильный размах (Q3-Q1) 0.025, асимметрия 12.213; эксцесс 794.520.

Характеристики других величин, уже учтенные в показаниях гравиметра, следующие. Температурная поправка (в мГал): минимум 0.15, максимум 0.39, среднее и медиана близки между собой и равны 0.250. Поправки за лунно-солнечное притяжение (в мГал): минимум –0.102, максимум 0.046, среднее –0.047, медиана –0.057.

В целом можно отметить, что данные качественные, их не надо дополнительно преобразовывать, например, ранжировать и придавать веса в зависимости от числа забракованных отсчетов.

Для обработки и анализа временных рядов была создана на языке программирования Python программа «Анализ временных рядов».

Разработка программы необходима вследствие указанных далее причин.

1) обработка результатов в рамках табличных процессоров (Microsoft Excel, LibreOffice Calc и др.) относительно трудоемка, для ускорения и упрощения работы требуется программирование на встроенных языках этих таблиц;

2) отсутствие свободных (open source) программ для анализа гравиметрических временных рядов;

3) имеющиеся геофизические программы либо предназначены для обработки профильных гравиметрических данных, либо предназначены для обработки других (магнитотеллурических) методов;

4) использование статистических программ общего назначения предполагает специальную подготовку данных к вводу; возможна адаптация статистических программ с использованием встроенных языков, но в этом случае от значительного объема программирования не уйти.

При этом дополнительного положительного эффекта не будет, поскольку все алгоритмы имеются в библиотеках Python. Применение статистических пакетов оправдано, пожалуй, для проверки работы некоторых алгоритмов разрабатываемой программы.

Для разработки программы «Анализ временных рядов» использовались следующие библиотеки языка Python: Tkinter – создание графического интерфейса; Matplotlib – визуализация данных и результатов обработки; NumPy – векторные операции с массивами (векторизация данных существенно ускоряет и облегчает программирование); Scipy – набор главных общеупотребительных математических алгоритмов; Statsmodels – статистические модели; Scikit-learn – линейная регрессия; Numba – ускорение вычислений для собственных алгоритмов.

В программе предусмотрена возможность контроля и преобразования введенных данных с выдачей статистики или диагностических сообщений об исходных и измененных данных.

Например, анализ временного ряда стандартного отклонения (рис. 1) показал следующее: положительное значение асимметрии (12.213) указывает на то, что правый хвост распределения длиннее левого, что хорошо видно на распределении, приведенном на рис. 2а. Большая величина эксцесса, равная 794.520, свидетельствует о наличии очень острого пика распределения случайной величины. В геофизике и других науках такого рода наборы данных с преобладающим правым хвостом распределения свидетельствуют о его логнормальном характере. Логнормальное распределение может быть приведено к нормальному виду за счет логарифмирования данных, что хорошо иллюстрирует рис. 2б.



Рис. 1. Временной ряд стандартного отклонения отсчетов

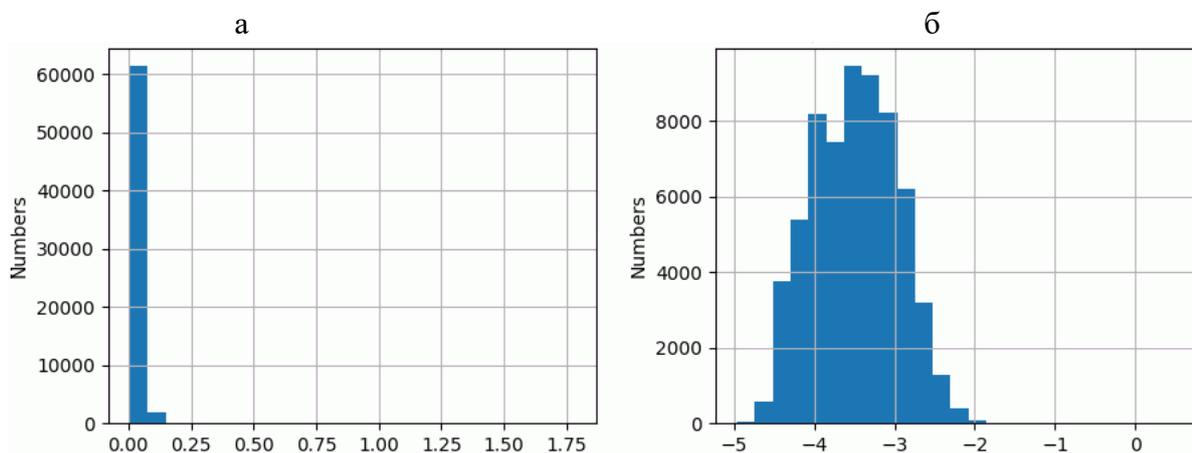


Рис. 2. Распределение значений стандартного отклонения.  
а – исходные значения, б – логарифмированные значения

Другие этапы работы с данными также предусматривали численный и визуальный контроль.

В программе были реализованы все указанные выше компоненты базового набора обработки: осреднение в скользящих окнах разной длины; построение линейной аппроксимации данных; спектральный анализ (получение амплитудно-частотных характеристик) с использованием быстрого преобразования Фурье, вычисление автокорреляционных функций с построением доверительных интервалов для них. Для исходных

данных статистически значимые значения автокорреляционной функции были для 3000-6000 отсчетов (50-100 часов). Для стандартного отклонения статистически значимые значения автокорреляционной функции были для 3000 отсчетов.

### **Выводы**

Таким образом, на данном этапе работ выполнено следующее:

а) собраны материалы российских и зарубежных авторов по анализу гравиметрических временных рядов;

б) проанализированы особенности работы с данными, выделены наиболее часто встречающиеся алгоритмы обработки и интерпретации;

в) создан первый вариант программы «Анализ временных рядов», включающий: ввод и контроль данных, визуализацию, расчет описательной статистики, снятие линейного тренда, сглаживание в скользящем окне, спектральный Фурье-анализ, расчеты автокорреляционных функций и доверительных интервалов для них.

Дальнейшие направления исследований связаны как с техническими, так и сущностными совершенствованиями программы.

Технические улучшения: предполагаю более широкое использование возможностей Python:

а) хранение в базе данных временных рядов и результатов, что обеспечит удобство работы с данными, снимая необходимость написания своих процедур выборки, фильтрации и др.; рационально опробовать в качестве баз данных SQLite и PostgreSQL как варианты бессерверной и клиент-серверной баз данных;

б) разработка клиент-серверного варианта, что позволит создать базу к переходу от десктопного к веб-приложению;

в) тестирование новых интерфейсных библиотек (Flet, Streamlit и др.), поскольку функциональные возможности Tkinter хотя и просты при первоначальном старте, но в дальнейшем очень трудно расширяемы.

Сущностные усовершенствования предполагают расширение спектра применяемых алгоритмов и способов обработки:

а) использование всех возможностей математических и статистических библиотек Python: регрессионные зависимости, статические оценивания форм распределений для различных данных и др.;

б) работа с несколькими наборами данных с распараллеливанием вычислений по ядрам процессора.

## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Антонов Ю.В. Высокочастотные колебания неприливных сейсмо-гравитационных пульсаций // Вестник ВГУ. Сер. Геология. – 2022. – № 3. – С. 66-75. – DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2022/3/66-75.
2. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Неприливные вариации силы тяжести как возможный критерий краткосрочного прогноза землетрясений // Экологический вестн. науч. центров Черноморского экономич. сотрудничества. – 2015. – Т. 12, № 1. – С. 5-13.
3. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Синхронность сейсмогравитационных пульсаций // Вестник ВГУ. Сер. Геология. – 2020. – № 2. – С. 76-82. – DOI: 10.17308/geology.2020.2/2861.
4. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю., Волкова Е.Н. Результаты синхронных наблюдений лунно-солнечных вариаций силы тяжести в различных широтах (гг. Саратов и Бишкек) // Вестник ВГУ. Сер. Геология. – 2010. – № 1. – С. 213-217.
5. Тимофеев В.Ю., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф., Ардюков Д.Г., Валитов М.Г., Тимофеев А.В., Носов Д.А., Сизиков И.С., Бойко Е.В., Горнов П.Ю., Кулинич Р.Г., Колпащикова Т.Н., Прошкина З.Н., Назаров Е.О., Колмогоров В.Г. Вариации силы тяжести и смещений в зонах сильных землетрясений на востоке России // Физика Земли. – 2018. – № 3. – С. 45-59. – DOI: 10.7868/S0002333718030043.

6. Гравиметры CG-5 Autograv // Поверь.ру: сайт. – Текст электронный. – URL:<http://www.pover.ru/spravochnik-sredstv-izmerenij/60415-15-gravimetry-cg-5-autograv>. (Дата обращения 28.09.2023).
7. Прошкина З.Н., Валитов М.Г., Кулинич Р.Г., Колпащикова Т.Н. Изучение приливных вариаций силы тяжести в зоне перехода от континента к Японскому морю // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. – 2015. – № 3 (27). – С. 71-79.
8. Каленицкий А.И., Ким Э.Л. О комплексной интерпретации данных геодезическо-гравиметрического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа // Вестник СГГА. – 2012. – № 4. – С. 3-13.
9. Милюков В.К., Юшкин В.Д., Миронов А.П., Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Дзеранов Б.В. Мониторинг приращений силы тяжести на опорных гравиметрических пунктах Северного Кавказа высокоточными относительными гравиметрами // Геология и Геофизика Юга России. – 2013. – № 2. – С. 39-45.
10. Морозов А.В., Баранов В.Н., Андреев В.К. Вариации силы тяжести из-за влияния уровня грунтовых вод на площадке строительства уникальных зданий и сооружений // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 4. – С. 92-97. – DOI: 10.17513/use.37815.
11. Абрамов Д.В., Бебнев А.С., Бычков С.Г., Горожанцев С.В., Герман В.И., Дробышев М.Н., Конешов В.Н., Красилов С.А., Овчаренко А.В., Юшкин В.Д. Одна из возможных причин синхронных континентальных микросейсм Северной Евразии // Физика Земли. – 2020. – № 4. – С. 123-131. – DOI: 10.31857/S000233372004002X.
12. Кирсанов С.А. Арно О.Б., Меркулов А.В., Арабский А.К., Андреев С., Картелян Е.Д., Афанасьев П.Р. Современные технологии гравиметрического мониторинга для контроля последствий отбора газа из недр // Газовая промышленность. – 2015. – № 10. – С. 36-41.
13. Тимофеев В.Ю., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В., Тимофеев А.В., Сизиков И.С., Носов Д.А., Смирнов М.Г. Гравиметрические наблюдения при солнечных затмениях в Сибири // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 125-137.
14. Дробышев М.Н., Абрамов Д.В., Бычков С.Г., Конешов В.Н., Герман М.И., Храпенко О.А., Горожанцев С.В., Красилов С.А., Бебнев А.С., Овчаренко А.В. Эксперимент по изучению синхронных континентальных микросейсм в Северной Евразии методом комплексирования гравиметрических и сейсмических наблюдений // Геология и геофизика юга России. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 83-94. – DOI:10.23671/VNC.2019.2.31979.
15. Francis O. Long time series of absolute gravity observations in Kulusuk, southeast Greenland // Geoscience Data Journal. – 2022. – 00. 1-4. – DOI: 10.1002/gdj3.183.
16. GRACE Satellite Gravimetry for Geosciences. Remote Sensing. Special Issue. – 2021. – URL: [https://www.mdpi.com/journal/remotesensing/special\\_issues/GRACE\\_Geo](https://www.mdpi.com/journal/remotesensing/special_issues/GRACE_Geo). (дата обращения 28.09.2023).
17. Gravity Field, Temporal Variations from Space Techniques // Encyclopedia of solid earth geophysics. – Springer, 2021. – P. 621-626.
18. Gravity, Global Models // Encyclopedia of solid earth geophysics. – Springer, 2021. – P. 677-691.
19. Gravity Method, Satellite // Encyclopedia of solid earth geophysics. – Springer, 2021. – P. 645-656.

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2023.4.9

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ШАХТНЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СОЛЯНЫХ РУДНИКАХ

С.В. Иванов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Необходимость ведения шахтных сейсморазведочных исследований обусловлена их высокой разрешающей способностью, что в комплексе с геологоразведочными данными и результатами наземной сейсморазведки позволяет повысить информативность интерпретационных заключений о строении и состоянии горного массива над выработками.

**Ключевые слова:** шахтная сейсморазведка, отраженные волны, продольные волны, поперечные волны, горные выработки, калийные месторождения.