МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИОН ДЛЯ РАСЧЁТА И АНАЛИЗА ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ГНСС НАБЛЮДЕНИЙ В ЗОНЕ ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ

Сагарьяров И.А.[1,2], Полтавцева Е.В.[1,2]

1 – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия
2 – Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, Петропавловск-Камчатский, Россия

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы лаборатория комплексного мониторинга сейсмоактивных сред Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН активно ведет работы, связанные с мониторингом полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы в районе Авачинского залива (восточное побережье Камчатки), в целях повышения эффективности функционирующей в настоящее время системы прогнозирования сейсмической опасности для района Петропавловск-Камчатской городской агломерации [1].

Первый этап работ (2023-2024 гг.) включал в себя создание программного обеспечения «Ион», способного визуализировать, обрабатывать и сохранять результаты расчетов значений наклонного и вертикального ПЭС, полученных, в основном, с использованием других программ [2].

На этом этапе были обработаны данные Камчатской ГНСС-сети на временном интервале подготовки крупного Жупановского землетрясения (30.01. 2016 г., Mw=7.2) и получены результаты, указывающие на значительные возмущения вариаций ПЭС на заключительной стадии подготовки землетрясения [3].

К настоящему моменту проведена значительная модернизация программного обеспечения, по двум основным направлениям.

① Первое направление охватывает мероприятия, ориентированные на повышение эргономичности взаимодействия с программным продуктом.

② Второе направление связано с адаптацией вычислительного ядра и вспомогательных модулей к специфике используемых массивов данных

ⓘ Эргономичность взаимодействия с ПО — это степень того, насколько удобно, понятно и естественно пользователю работать с программой

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Цель: сделать обработку данных удобной и устойчивой к реальному формату исходных данных — развить ПК «Ион» в направлении эргономики (GUI, визуализация данных) и поддержки фактических форматов хранения (сжатие, RINEX 3, ГЛОНАСС).

В рамках развития программного решения предполагалась реализация следующих функциональных модулей:

- разработка графического пользовательского интерфейса;
- внедрение модуля визуализации данных с поддержкой алгоритмов интерполяции;
- реализация функционала обработки сжатых файлов;
- расширение перечня поддерживаемых версий формата RINEX;
- интеграция поддержки навигационной системы ГЛОНАСС.

ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС

Изначально программа работала в консольном режиме: для управления требовалось использовать командную строку и настраивать параметры через конфигурационный файл. Такой подход предъявлял повышенные требования к квалификации пользователя и усложнял старт работы с системой.

```
~/projects/go/Ion  develop ±  go run ./cmd/app/main.go
Info: Запуск программы...
Info: Найден файл конфигурации config.toml. Будут использоваться значения из этого файла
Info: Программа готова к расчету
Info: Чтение и обработка файлов...
2 / 2 [------------------------------------------------------------] 100.00% 18 p/s
Info: Файлы считаны и обработаны
Info: Сохранение результатов...
Info: Результаты сохранены /Users/kg/projects/go/Ion/results/2024_10_04_278-ed3
~/projects/go/Ion  develop ±
```

Рисунок 1. Пример работы консольной версии программы «Ион» (до создания графического интерфейса).

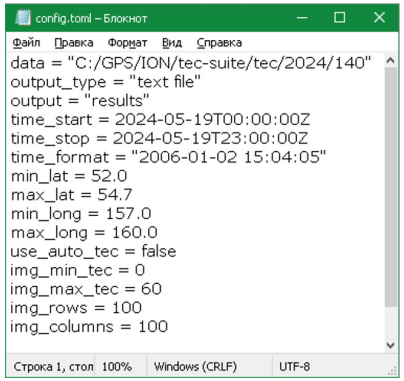


Рисунок 2. Пример конфигурационного файла.

ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС

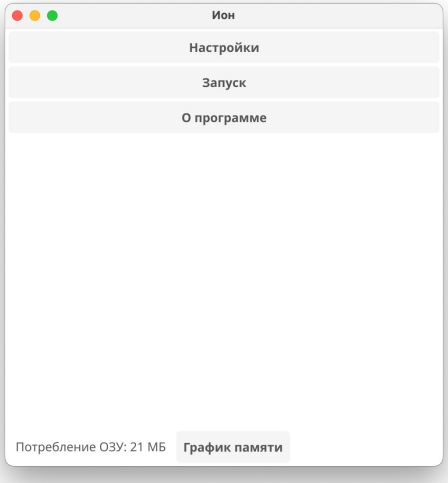


Рисунок 3. Главное окно программы «Ион» после добавления графического интерфейса.

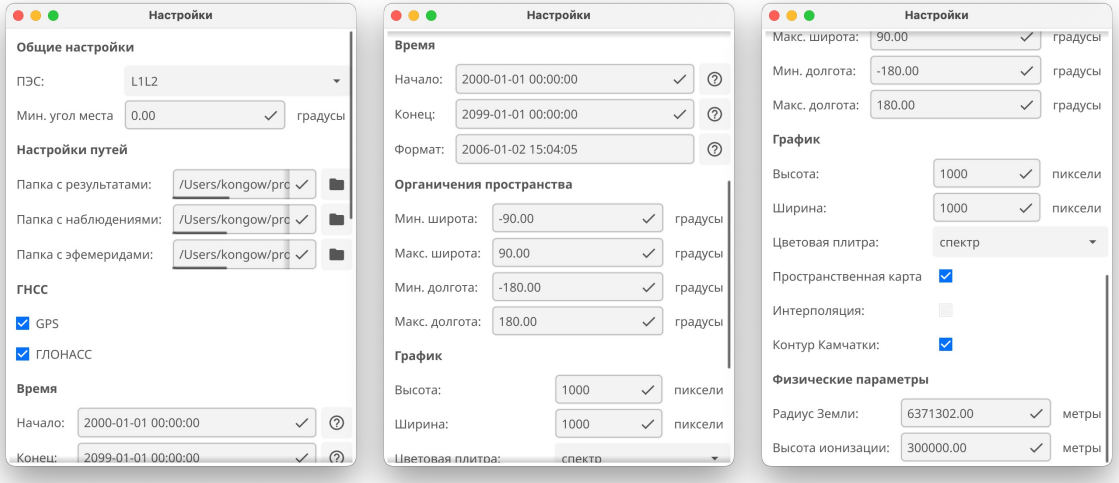


Рисунок 4. Окно с настройками программы «Ион», заменяющее редактирование конфигурационного файла.

В результате модернизации консольный интерфейс заменён на графический (реализован с помощью Fyne.io). Теперь все операции выполняются через интуитивно понятную визуальную оболочку — необходимость взаимодействовать с командной строкой отпала. Это сделало программу доступнее, в том числе для пользователей без специальных навыков. Кроссплатформенность решения обеспечена за счёт Fyne.io: интерфейс можно скомпилировать под различные операционные системы и процессорные архитектуры.

ГРАФИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕЙС

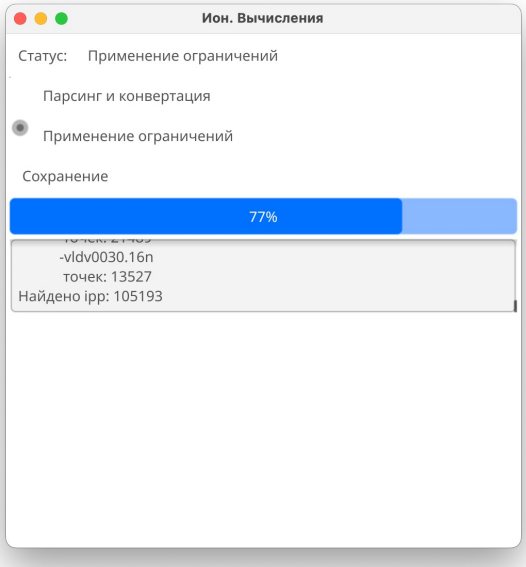


Рисунок 5. Окно вычислений программы «Ион», показывает процесс вычисления.

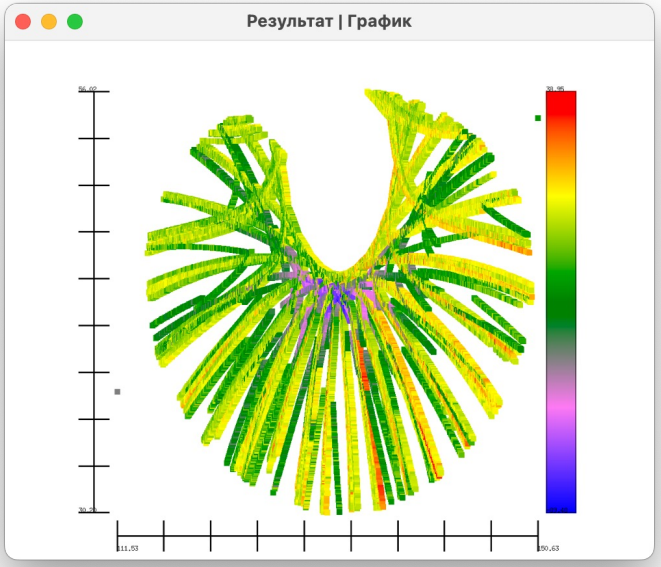


Рисунок 6. Окно визуализации рассчитанного ПЭС ионосферы, включается пользователем в настройках программы.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ

В рамках формирования выходных представлений результатов обработки данных реализована функциональность визуализации расчётных величин. Данная мера направлена на повышение наглядности и удобства интерпретации итоговых данных конечным пользователем.

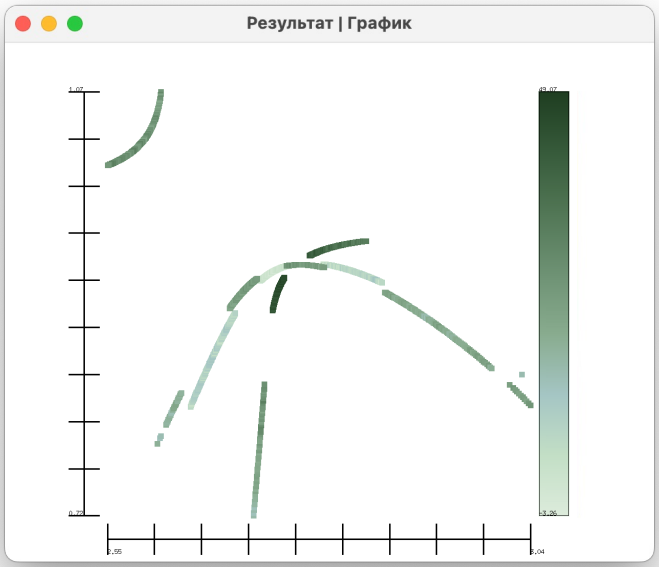


Рисунок 7. Окно визуализации рассчитанного ПЭС ионосферы, не интерполированные данные.

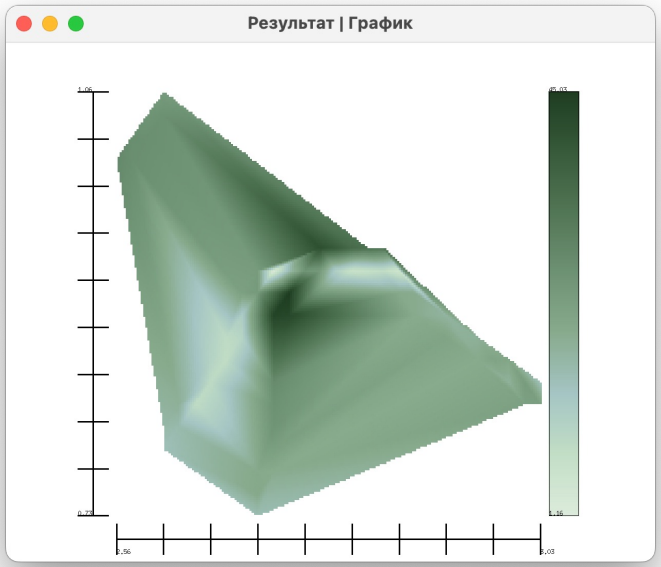


Рисунок 8. Окно визуализации рассчитанного ПЭС ионосферы, интерполированные данные.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ

Поскольку в экосистеме языка программирования Go отсутствуют готовые высокоуровневые библиотеки визуализации, сопоставимые по функциональности с такими решениями, как Matplotlib в языке Python, для обеспечения требуемого уровня представления данных были разработаны собственные программные модули. В состав программного комплекса включён специализированный модуль визуализации, предназначенный для графического отображения результатов расчётов в виде графиков.

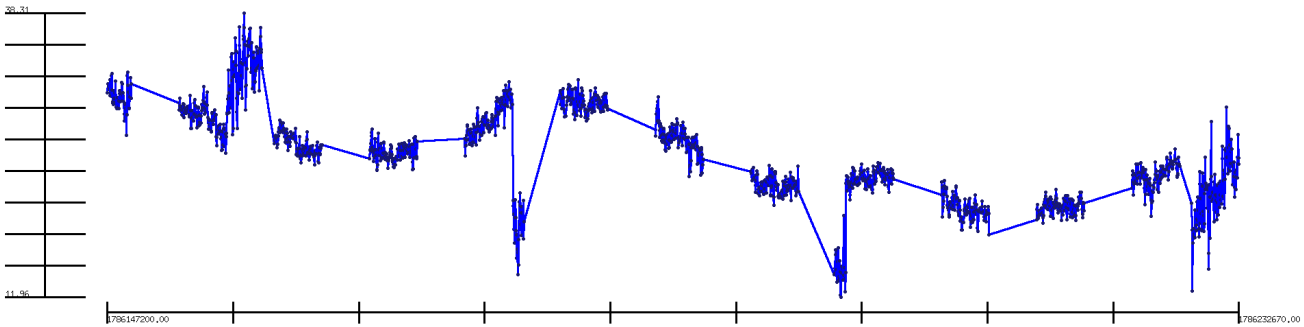


Рисунок 9. Пример линейного графика с точками в узлах.

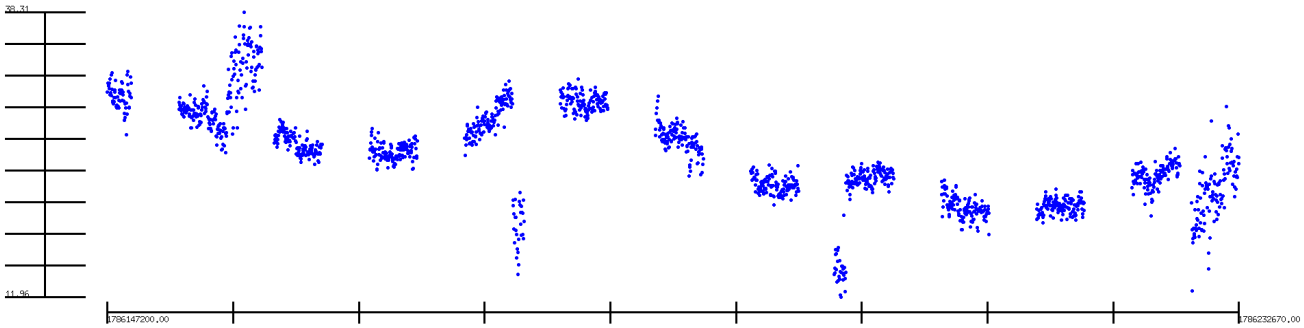


Рисунок 10. Пример точечного графика.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ

Дополнительно в архитектуру решения интегрирован математический модуль, содержащий набор прикладных математических функций, обеспечивающих поддержку процедур обработки и анализа данных. В частности, в рамках данного модуля реализована функциональность двумерной интерполяции, применяемая для восполнения отсутствующих значений на пространственной сетке (заполнения пробелов на карте). Алгоритм формирования итогового графического представления предусматривает последовательное выполнение двух этапов: на первом этапе осуществляется интерполяция исходных данных с целью восстановления недостающих значений, на втором — визуализация обработанного массива данных посредством отрисовки результирующей карты.

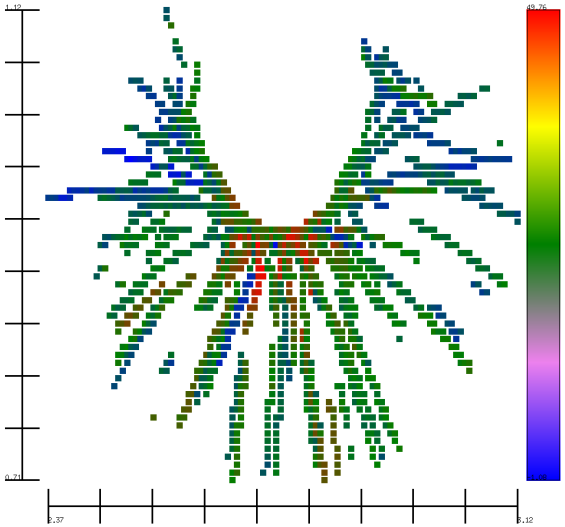


Рисунок 11. Пример не интерполированных данных на тепловой карте.

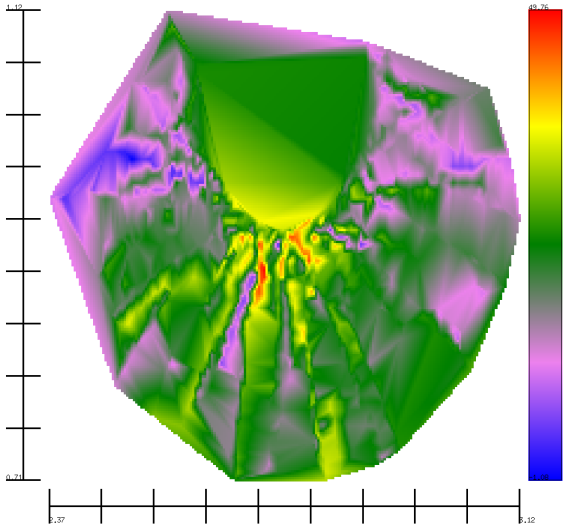


Рисунок 12. Пример интерполированных данных на тепловой карте. Для интерполяции использовалась триангуляция Делоне.

СТРУКТУРА ФОРМАТА RINEX

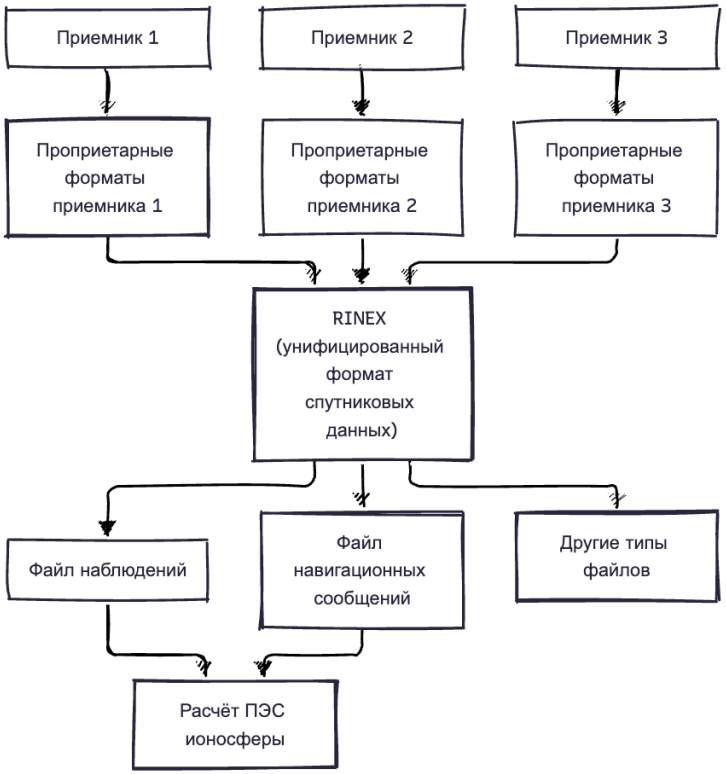


Рисунок 13. Схема показывающая положение формата RINEX в спутниковых данных.

RINEX (Receiver Independent Exchange Format) представляет собой стандартизированный формат хранения и обмена первичными данными, получаемыми от спутниковых навигационных систем. Его разработка была обусловлена необходимостью обеспечения унифицированного обмена измерительными данными в условиях многообразия проприетарных форматов, используемых различными типами приёмников спутниковой навигации.

Формат версии 2.11 включает в себя несколько видов файлов, из которых для вычисления значения ПЭС ионосферы требуется два.

1. Файл наблюдений — содержит данные, принятые со спутника приемником.

2. Файл навигационных сообщений — содержит данные эфемерид (параметров, необходимых для вычисления положения спутника в произвольный момент времени). Формируются различными аналитическими агентствами.

ОБРАБОТКА СЖАТЫХ ФАЙЛОВ

При эксплуатации ПО «Ион» установлено, что ~90 % используемых массивов данных представлены в сжатом виде, из-за чего на этапе предварительной подготовки значительная доля временных ресурсов исследователей затрачивалась на ручную распаковку файлов, снижая эффективность рабочего процесса.

Для устранения ограничения в архитектуру ПО интегрирована функциональность автоматизированной обработки сжатых файлов в рамках рабочего цикла программы.

В ходе реализации выявлена проблема несоответствия декларируемого и фактического форматов сжатия: в ряде случаев в метаданных указано .Z, тогда как реальная структура файла соответствует .gzip, что могло приводить к ошибкам распаковки и нарушению целостности данных.

Решением стала идентификация типа файла по «магическим числам» — байтовым сигнатурам в начальной части файла, однозначно определяющим его формат. Это обеспечило корректную автоматическую детекцию реального типа сжатия независимо от метаданных. Схема обработки включает проверку магических чисел, определение формата сжатия и применение соответствующего алгоритма распаковки для подготовки данных к дальнейшей обработке.

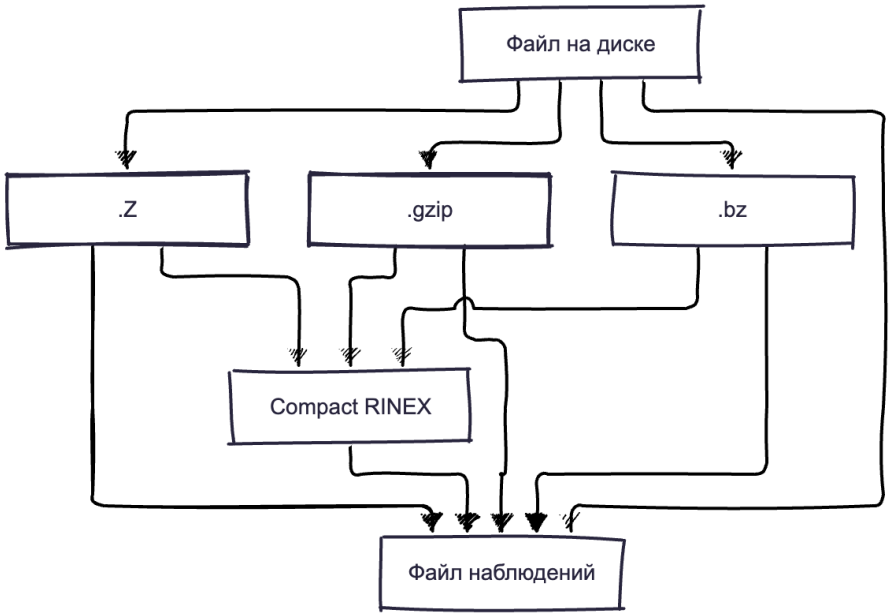


Рисунок 14. Схема процесса подготовки (разархивирования) файла наблюдений к парсингу.

ⓘ Compact RINEX — сжатая версия формата RINEX, которая используется для хранения и обмена данными.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПЭС

Для расчёта ПЭС (англ. TEC) ионосферы по данным навигационных спутников, использовалась формула [4]

$$TEC = \frac{1}{40{,}308}\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}(P_1 - P_2),$$

где f_1, f_2 — несущие частоты, P_1, P_2 — псевдодальности, измеренные приёмником. Измеряется в $1TECU = 10^{16}$эл/м^2.

ⓘ Псевдодальности P_1 и P_2 передаются в RINEX-файлах. В версии 2.xx они указаны именно как P1 и P2 в блоках наблюдений.

ПОДДЕРЖКА НОВЫХ ВЕРСИЙ RINEX-ФАЙЛОВ

В связи с переходом части камчатских станций на новую версию формата RINEX возникла необходимость расширения функциональности программного комплекса путём интеграции поддержки обновлённого стандарта.

Внедрение поддержки новой версии формата обеспечило следующие возможности:

- расширенное описание кодов наблюдений — позволяет повысить контроль над данными, однако усложняет выбор релевантных параметров для расчётов; вместо двухбуквенного обозначения (C1 и P2 — параметр для гражданского использования и параметр повышенной точности соответственно), используется трехбуквенное, что повышает вариативность (C1W, C1L, C1P, C1C и д.р.);
- поддержка новых глобальных навигационных спутниковых систем — создаёт потенциал для их использования в последующих вычислениях;
- упрощённая схема парсинга файла — способствует повышению эффективности обработки данных.

ИНТЕГРАЦИЯ ПОДДЕРЖКИ СПУТНИКОВ ГЛОНАСС

В программный комплекс интегрирована поддержка системы ГЛОНАСС — это позволило полноценно использовать уже содержащиеся в RINEX-файлах данные этой навигационной системы.

Результаты внедрения:

– объём получаемых данных из обрабатываемых файлов увеличен вдвое за счёт совместного использования измерений GPS и ГЛОНАСС;

– выполнена верификация GPS-данных путём сопоставления с измерениями ГЛОНАСС — полученные результаты демонстрируют сопоставимую динамику и близкие значения, что подтверждает достоверность исходных данных и повышает надёжность итоговых расчётов.

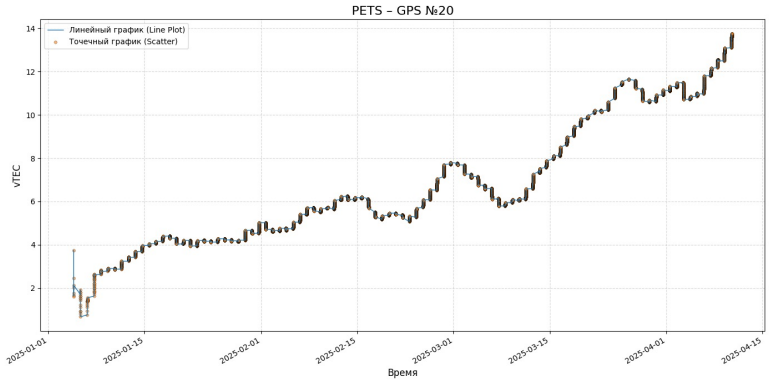


Рисунок 15. Ряд ПЭС ионосферы для спутника GPS20 и станции PETS

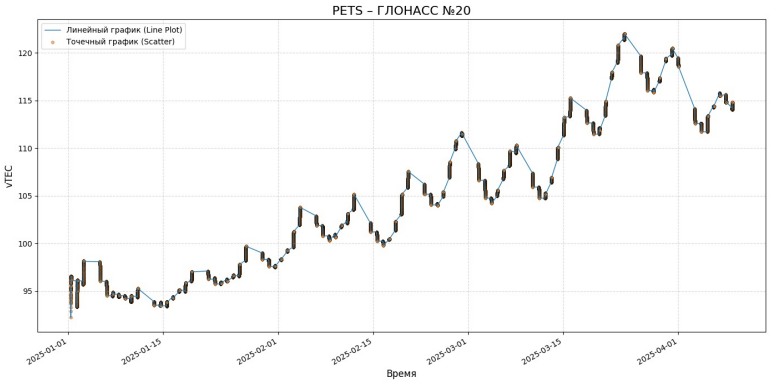


Рисунок 16. Ряд ПЭС ионосферы для спутника ГЛОНАСС20 и станции PETS

РЕГИСТРАЦИЯ ПО В РОСПАТЕНТЕ

Программное обеспечение для расчёта полного электронного содержания ионосферы по данным глобальных навигационных спутниковых систем «Ион» зарегистрировано в Роспатенте в 2026 году.



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026686343

«Программа для расчёта полного электронного содержания ионосферы по данным глобальных навигационных спутниковых систем «Ион»

Правообладатели: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (RU), Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга" (RU)*

Автор(ы): *Сагарьяров Илья Александрович (RU)*

Заявка № **2026681307**

Дата поступления **08 июля 2026 г.**

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ ***31 августа 2026 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Рисунок 17. Свидетельство о регистрации программы «Ион» в Роспатенте.

ВЫВОДЫ

Модернизация ПК «Ион» повысила эффективность обработки данных о ПЭС ионосферы.

Внедрён GUI (Fyne.io) и модуль визуализации с интерполяцией — упрощён интерфейс и улучшена наглядность результатов.

Реализована автоматизированная обработка сжатых файлов с детекцией по «магическим числам» — обеспечена устойчивость к ошибкам в метаданных.

Расширена поддержка форматов: новые версии RINEX и данные ГЛОНАСС — увеличен объём и разнообразие обрабатываемых измерений.

Комплекс готов к регулярному применению в системе прогноза сейсмической опасности для района Авачинского залива и масштабированию на другие ГНСС-сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gavrilov V.A., Poltavtseva E.V., Buss Yu.Yu. et al. Kamchatka Megaearthquake on July 29, 2025: Reflection of the Preparation Process in the Results of Multi-Instrumental Geophysical Measurements in the Avacha Bay Area // Russian Journal of Earth Sciences. 2026. V. 26. No 2. https://doi.org/10.2205/2026es001120
2. Сагарьяров И.А., Полтавцева Е.В., Гаврилов В.А. Первые результаты разработки и применения программного обеспечения для создания карт пространственного распределения полного электронного содержания ионосферы для района Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона. Тезисы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2024 г. С. 439. DOI 10.21046/22DZZconf-2024a.
3. Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В., Сагарьяров И.А. и др. О связи изменений полного электронного содержания ионосферы перед сильными камчатскими землетрясениями с изменениями удельного электрического сопротивления геосреды // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16. № 4. https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-4-0837
4. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск, 2006. 479 с.