

**Барсуков А.И.<sup>1</sup>, Скрипачев В.О.<sup>2</sup>, Суровцева И.В.<sup>2</sup>, Тихомирова Н.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский технологический университет (МИРЭА), г. Москва, Россия

## **КОМПЛЕКСНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ БОРТОВОЙ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ**

### **АННОТАЦИЯ**

*Представлены результаты обработки данных бортовой научной аппаратуры КА DEMETER и КА CHAMP по разработанному алгоритму для изучения природных явлений, связанных с сейсмической активностью. Предложен комплекс вычислительных программ, созданных на разных языках программирования, учитывая специфику данных измерений космических аппаратов и поставленных научно-исследовательских задач.*

### **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

*Космический аппарат; бортовая научная аппаратура; обработка данных; электронная плотность; землетрясение; алгоритм; вычислительная программа.*

**Barsukov A.I.<sup>1</sup>, Skripachev V.O.<sup>2</sup>, Surovtseva I.V.<sup>2</sup>, Tikhomirova N.A.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>National research university «Higher school of economics», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Technological University (MIREA), Moscow, Russia

## **COMPLEX APPLYING OF COMPUTATIONAL PROGRAMS FOR SCIENTIFIC ON-BOARD APPARATUS DATA PROCESSING**

### **ABSTRACT**

*The results of scientific on-board DEMETER and CHAMP apparatus have been introduced, using the developed algorithm for analysis of natural seismic activity connected events. The complex of computational programs created in different programming languages has been suggested according to particular characteristics of satellite measurement data and set scientific problems.*

### **KEYWORDS**

*Satellite; on-board apparatus; data processing; electron density; earthquake; algorithm; computational software.*

С помощью демонстрационных и моделирующих средств информационных технологий посредством разработки алгоритмов, с последующей их реализацией в научном программном обеспечении, можно получать значимые результаты для изучения природных процессов и явлений.

Природные явления, связанные с сейсмической активностью, проявляются не только в литосфере и в атмосфере, но и в ионосфере, где они наблюдаются за несколько часов или дней как до, так и после землетрясения [2]. Поэтому очень важно иметь информацию о предвестниках сейсмической активности с целью предопределения и предотвращения этого опасного явления.

Эксплуатация на орбите целевой научной аппаратуры позволяет получать достаточное количество измерений, обработка которых проводится с применением комплекса вычислительных программ.

В настоящей работе, учитывая специфику данных космического аппарата (КА) DEMETER и КА CHAMP, предложен комплекс вычислительных программ, созданных на разных языках программирования, таких как IDL, JAVA, VBA [1, 3, 8].

Для изучения процессов, предшествующих землетрясениям и возбуждающих электромагнитные волны в верхней атмосфере, 29 июня 2004 г. в 6:30 (UT) с космодрома Байконур на круговую орбиту ~ 700 км был запущен французский малый (массой ~130 кг) КА DEMETER, который проработал на орбите до конца 2010 года. Немецкий КА CHAMP был запущен 15 июля 2000 г. с космодрома Плесецк и предназначался для изучения атмосферы и ионосферы. Высота его орбиты варьировалась от 370 до 320 км. КА проработал до середины 2010 года.

В составе установленной на борту КА DEMETER и КА CHAMP научной аппаратуры, имеется Лэнгмюровский зонд ISL для измерения электронной температуры, концентрации электронов и ионов в ионосферной плазме.

С сайта *earthquake.usgs.gov* получен список землетрясений, произошедших в период, когда работали оба космических аппарата, имеющих магнитуду не менее 7 баллов, глубину эпицентра не более 50 км. Под эти критерии подошли 43 события.

Данные КА *CHAMP* взяты с сайта *isdc.gfz-potsdam.de*, а данные КА *DEMETER* – с сайта *cdpp-archive.cnes.fr*. Результаты измерений были в виде заархивированных файлов формата «*dat*». Для каждого землетрясения они собирались за период: начиная 14 сутками до землетрясения и заканчивая 7 сутками после события.

Для уменьшения объема анализируемых исходных данных отбирались траектории пролета КА, находящиеся от эпицентров на расстоянии, не превышающем  $\rho$ . Расчет расстояния  $\rho$  проводился с учетом оценки зоны подготовки землетрясения [7]:

$$\rho = 10^{0.43M},$$

где  $\rho$  – радиус зоны подготовки землетрясения;  $M$  – магнитуда предполагаемого события.

Расстояние между КА и эпицентром рассчитывалось по формулам, указанным в [5].

Для поиска сейсмо-ионосферных возмущений по данным концентрации электронов, полученных с борта КА, применялся метод наложения эпох [4]. Для этого в качестве параметров были взяты средние за день значения электронной плотности, полученные в окрестности эпицентра землетрясения в течение нескольких дней до и после события, с КА *CHAMP* и КА *DEMETER*. Массивы ежедневных значений концентрации электронов были преобразованы в формат *.xlsx*.

Для обработки данных научной аппаратуры авторами были разработаны и последовательно использованы программы визуализации и отбора данных КА, а также программа, реализующая метод наложения эпох.

С помощью первой программы строилась графическая визуализация пространственных (географических) данных КА *CHAMP* и КА *DEMETER* (рис.1), что позволило увидеть траекторию полета аппарата относительно эпицентра для каждого полувитка, а измерения, выполняемые бортовой аппаратурой КА в указанных районах, сохранялись в виде текстовых файлов.

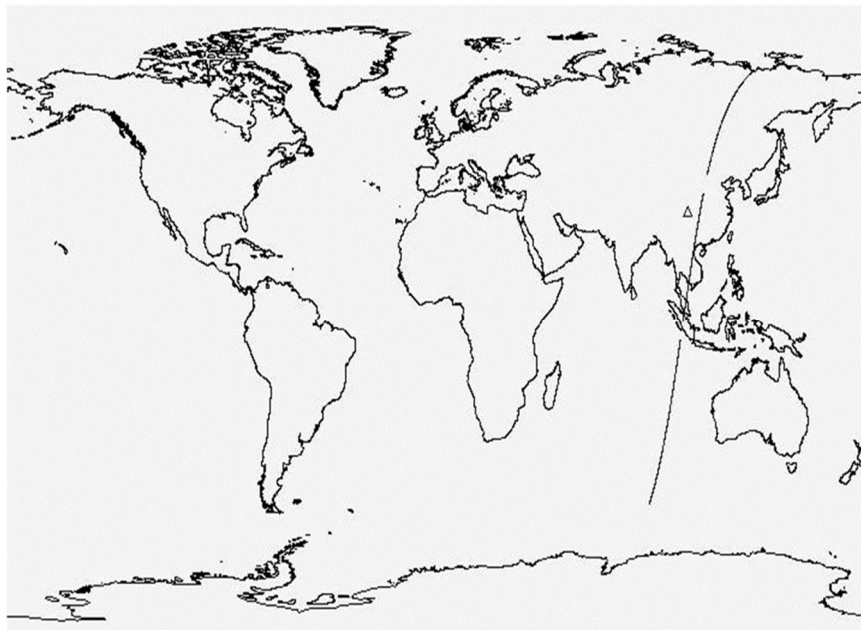
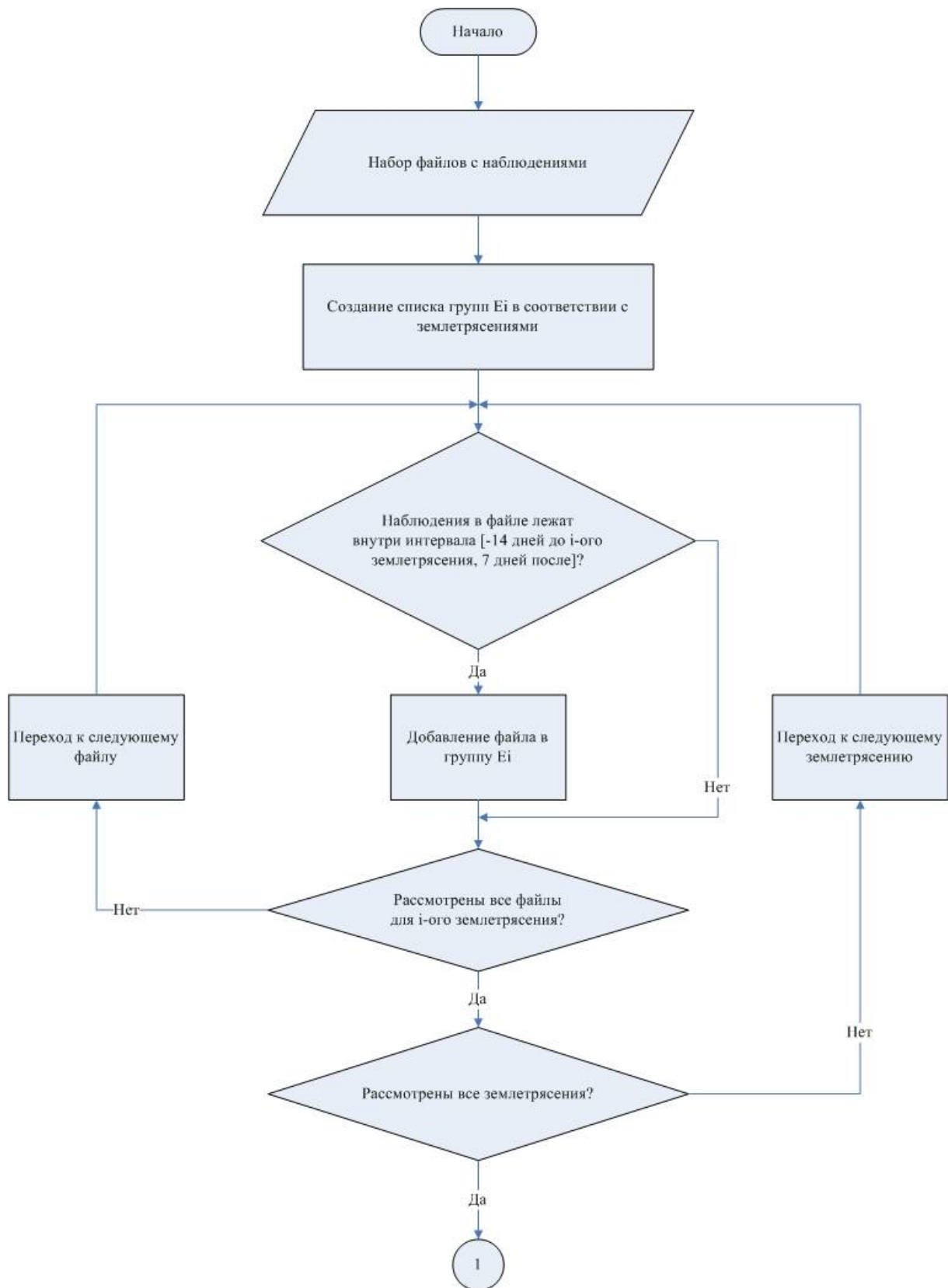


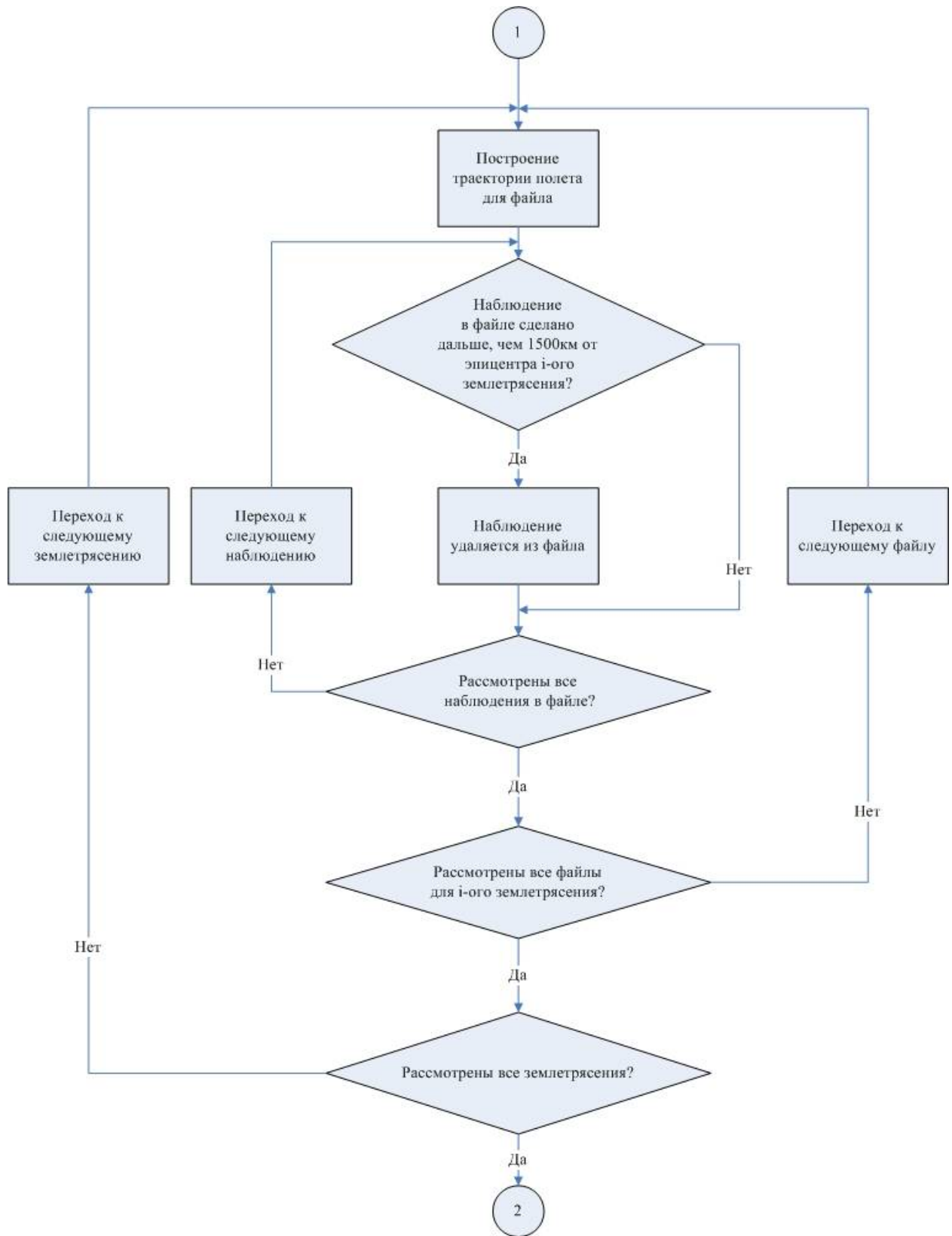
Рис.1. Графическая визуализация траектории КА *DEMETER*

На рисунке 1 треугольником обозначен эпицентр землетрясения, произошедшего 12.05.2008г, кривая – траектория полета КА, также изображены очертания поверхности суши.

Полученные текстовые файлы являлись исходными данными для второй программы, реализующей метод наложения эпох.

На рисунке 2 представлен алгоритм обработки данных бортовой научной аппаратуры КА *DEMETER* и КА *CHAMP* с целью выявления аномалии в показаниях электронной плотности в выбранном временном интервале.





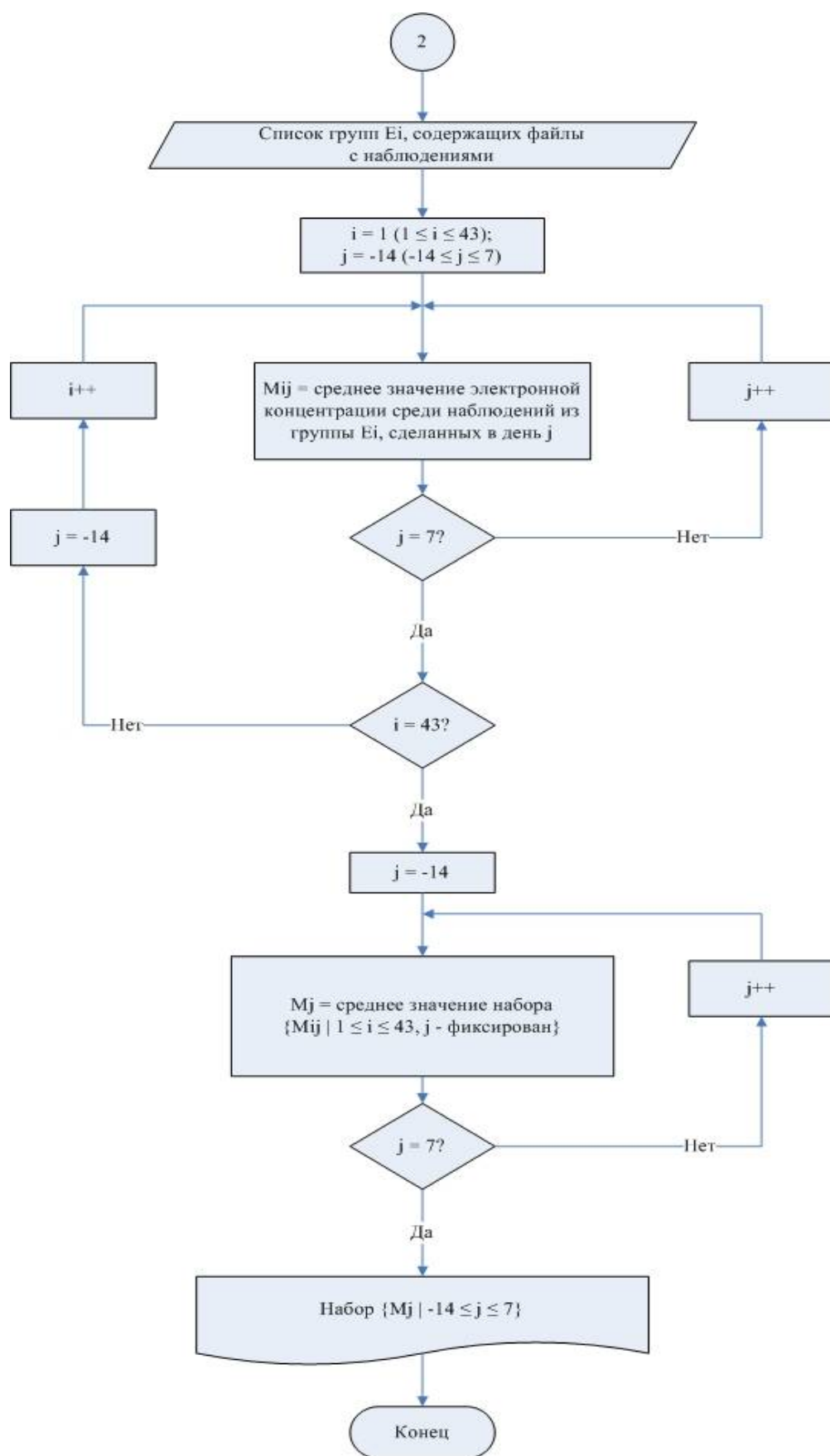


Рис.2. Алгоритм обработки данных бортовой научной аппаратуры КА DEMETER и КА CHAMP

Таким образом, применительно к значениям электронной плотности, для некоторой

временной окрестности каждого случая землетрясения, программно был реализован предложенный метод.

В общем случае его можно описать так: пусть есть список событий  $A_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ . Каждому событию  $A_i$  соответствует набор наблюдений  $E_i$ , которые были сделаны во временной окрестности ( $dayA_i - a$ ,  $dayA_i + b$ ):  $dayA_i$  обозначает день, когда случилось событие  $A_i$ ;  $a$  и  $b$  не зависят от  $i$  и являются постоянными. Далее, для каждого события  $A_i$  создается набор величин  $\{M_{ij} \mid -a \leq j \leq b\}$ , где  $M_{ij}$  – это среднее значение рассматриваемого параметра среди наблюдений, принадлежащих  $E_i$  и сделанных в  $j$ -й день относительно дня  $A_i$ . Затем осуществляется «наложение эпох», а именно, создается набор величин  $M_j$ , где

$$M_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{ij}.$$

То есть величина  $M_j$  является средним значением рассматриваемого параметра в  $j$ -й день среди всех землетрясений. После применения метода наложения эпох к данным космических аппаратов были получены соответственно два набора величин  $\{M_j\}$ .

По результатам работы программы, реализующей метод наложения эпох, было выявлено, что значимых возмущений для анализируемой выборки не наблюдалось.

Тем не менее, существуют землетрясения, для которых были получены выбросы, не связанные с солнечной активностью, и которые произошли за несколько дней до сейсмического события. Выбросы выявлены как для КА DEMETER, так и для КА CHAMP, посредством вычислительной программы.

На рисунках 3, 4 приведены результаты интервальной оценки значений электронной плотности для каждого КА для землетрясения, произошедшего в Кот д'Ивуаре 28.06.2007г.

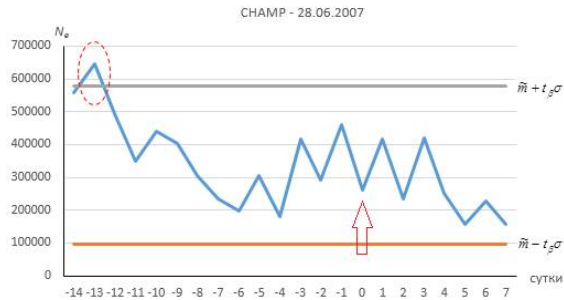


Рис.3. Интервальная оценка электронной плотности для КА CHAMP, стрелкой обозначен день землетрясения

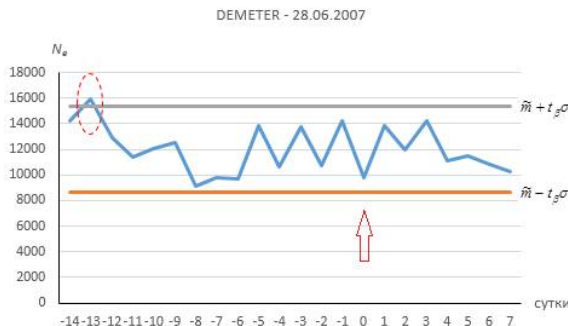


Рис.4. Интервальная оценка электронной плотности для КА DEMETER, стрелкой обозначен день землетрясения

При этом  $\tilde{m}$  – среднее значение выборки,  $\sigma$  – стандартное отклонение значений,  $t_\beta = 1.79$  – коэффициент, задающий границы доверительного интервала для  $\beta = 90\% - 95\%$  [6].

На графиках (рис.3, 4) видно, что на -13 сутки перед землетрясением с вероятностью не меньшей 0.95 наблюдается повышение электронной плотности. Но 15.06.2007г. Kp-индекс был равен 2, т.е. солнечная активность была очень низкая. Значит, превышение концентрации электронов могло быть связано с сейсмической активностью.

Для валидации данных научной аппаратуры космических аппаратов со значениями, полученными по модели ионосферы IRI-2012, создан программный модуль, который обращается к ресурсам виртуальной обсерватории ионосферы, термосферы и мезосферы (VITMO) по адресу <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo> (рис. 5).

Программный модуль формирует HTTP запрос типа GET к удаленному серверу VITMO и ресурсу модели ионосферы ([http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html)), базируясь на данных, соответствующих дате, времени и координатам КА, для которых проводились измерения

бортовой научной аппаратурой. Полученные по результатам расчета модели ионосферы IRI-2012 параметры сохраняются в текстовых файлах.

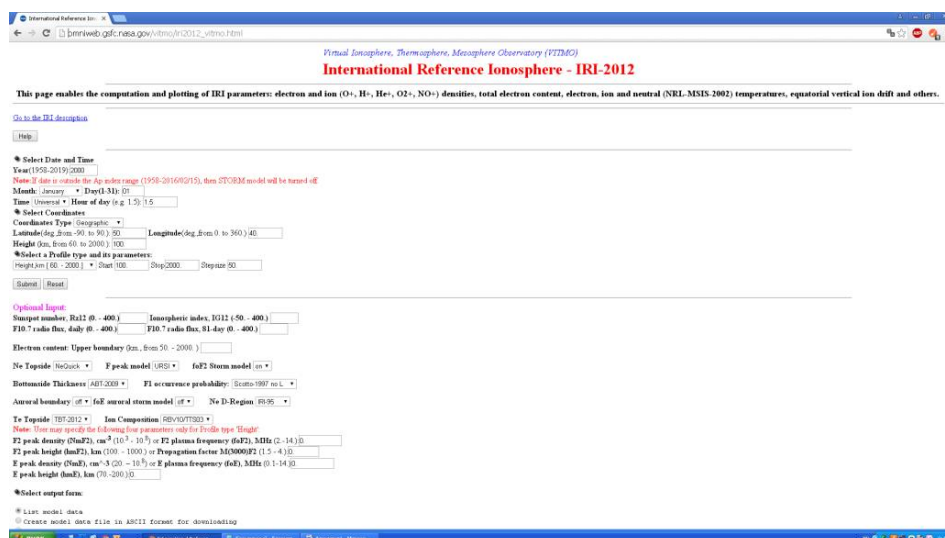


Рис.5. Скриншот сайта VITMO

Таким образом, в работе представлены результаты комплексной программной обработки данных бортовой научной аппаратуры КА *DEMETER* и КА *CHAMP*, предназначенной для обнаружения электромагнитной эмиссии над сейсмоактивными регионами.

Разработаны и последовательно использованы программы графической визуализации пространственных (географических) данных КА, наглядно представляя траекторию полетов аппаратов относительно эпицентра землетрясения для каждого полувитка, а также программа, реализующая метод наложения эпох по описанному алгоритму обработки данных измерений.

Демонстрационными средствами информационных технологий показаны результаты интервальной оценки значений электронной плотности с каждого КА для выбранного сейсмического события, а моделирующие средства позволили провести валидацию данных научной аппаратуры космических аппаратов.

*Руководитель научной работы: Полушковский Юрий Александрович, к.т.н., доцент.*

*Научный консультант: Пирхавка Алексей Петрович, к.т.н., доцент.*

## Литература

1. Герберт Шилдт. Java 8. Полное руководство. Издательство: Вильямс. 2015. - 1376 с.
2. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация; Ин-т физики Земли им. О.Ю.Шмидта.- М.: Наука, 2006. - 254 с.
3. Кузьменко В.Г. VBA. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2015. – 624 с.
4. Липеровская Е.В. Применение численного моделирования – метода Монте-Карло при анализе сейсмоионосферных эффектов / Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV междунар. конф., с. Паратунка Камч. обл., 14–17 авг. 2007 г.: сб. докл. Доп. – Петропавловск-Камч.: ИКИР ДВО РАН, 2007. – с.32-54
5. Скребушевский Б.С. Управление полетом беспилотных космических аппаратов. – М., «Владмо», 2003. – 436с.
6. Теория вероятностей: Учеб. Для вузов/ Е.С. Вентцель. – 8-е изд. – М.: Высш. шк., 2002. – 575 с.
7. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I. and Miachkin V.I.: 1979, Estimation of the size of earthquake preparation zone, Pure Appl.Geophys. 117, 1025-1044.
8. Gumley L.E. Practical IDL Programming. Morgan Kaufmann, 2001, 508 p.

## References

1. Gerbert Shildt. Java 8. Polnoe rukovodstvo. Izdatel'stvo: Vil'yams. 2015. - 1376 с.
2. Zav'yalov A.D. Srednesrochnyy prognos zemletryasenyi: osnovy, metodika, realizatsiya; In-t fiziki Zemli im. O.Yu.Shmida.- M.: Nauka, 2006. - 254 s.
3. Kuz'menko V.G. VBA. – M.: OOO «Binom-Press», 2015. – 624 s.
4. Liperovskaya E.V. Primenenie chislenного modelirovaniya – metoda Monte-Karlo pri analize seysmoionosfernykh effektov / Solnechno-zemnye svyazi i predvestniki zemletryasenyi: IV mezhdunar. konf., s. Paratunka Kamch. obl., 14–17 avg. 2007 g.: sb. dokl. Dop. – Petropavlovsk-Kamch.: IKIR DVO RAN, 2007. – s.32-54
5. Skrebusheskiy B.S. Upravlenie poletom bespilotnykh kosmicheskikh apparatov. – M., «Vladmo», 2003. – 436 s.
6. Teoriya veroyatnostey: Ucheb. Dlya vuzov/ E.S. Venttsel'. – 8-e izd. – M.: Vyssh. shk., 2002. – 575 s.
7. Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I. and Miachkin V.I.: 1979, Estimation of the size of earthquake preparation zone, Pure Appl.Geophys. 117, 1025-1044.
8. Gumley L.E. Practical IDL Programming. Morgan Kauf-mann, 2001, 508 p.

Поступила 14.10.2016г.

**Об авторах:**

**Барсуков Алексей Игоревич**, магистрант 1 года обучения факультета компьютерных наук Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), barsukov1995@gmail.com;

**Скрипачев Владимир Олегович**, к.т.н., доцент кафедры «Информационные космические системы» Московского технологического университета (МИРЭА), skripatchevv@inbox.ru;

**Суровцева Ирина Вячеславовна**, инженер научного центра Московского технологического университета (МИРЭА), irinavsur@yandex.ru;

**Тихомирова Наталия Александровна**, магистрант 1 года обучения института радиотехнических и телекоммуникационных систем Московского технологического университета (МИРЭА), nat51950181@yandex.ru.