

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ,
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 528.88(15) DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.4.3.15

**Макет информационного сервиса
автоматизированного мониторинга
и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений
в Камчатско-Сахалинском регионе**

О. А. Алексеев, *д. т. н., профессор, centr31@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. А. Пулинец, *д. ф.-м. н., pulse1549@mail.ru*

Институт космических исследований РАН, Москва, Российская Федерация

П. А. Будников, *pavel9860@gmail.ru*

Институт прикладной геофизики им. Е. К. Федорова, Москва, Российская Федерация

В. Б. Серебряков, *centr31@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Н. В. Разумова, *к. г. н., доцент, centr31@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. Д. Линьков, *centr31@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению результатов разработки и проверки функционирования макета информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений в Камчатско-Сахалинском регионе. Определены задачи макета сервиса по сбору, обработке данных о предвестниках землетрясений, формированию прогнозов сильных (с магнитудой 6 и более) землетрясений в виде оценок моментов времени их наступления, координат эпицентров (широта и долгота) и магнитуд землетрясений. С учетом геоинформационного характера исходных данных о наступающих землетрясениях в качестве основы для построения макета сервиса предложена геоинтеграционная платформа, позволяющая в единой геоинформационной среде интегрировать используемые информационные ресурсы систем мониторинга предвестников землетрясений, функции переработки мониторинговой информации в прогнозы землетрясений, результаты формирования прогнозов землетрясений и представления их потребителям. Рассмотрены состав макета сервиса и функционирование таких его элементов, как микросервисы: сбора и обработки данных приемников радионавигационных сигналов систем GPS/ГЛОНАСС; сбора и обработки данных о глобальном распределении ПЭС в ионосфере; сбора и обработки данных о геомагнитной обстановке, о потоке солнечного радиоизлучения, о тепловых аномалиях и данных об атмосферных аномалиях над территорией тестового участка, а также модуль представления и доведения до потребителей результатов работы макета информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений. Результаты функционирования макета сервиса проиллюстрированы на примерах ретроспективного прогнозирования ряда сильных землетрясений, произошедших за последние 10 лет в Камчатско-Сахалинском регионе, по данным их предвестников.

Ключевые слова: макет информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений, микросервис сбора и обработки данных приемников радионавигационных сигналов систем GPS/ГЛОНАСС, микросервис сбора и обработки данных о глобальном распределении ПЭС в ионосфере, микросервис сбора и обработки данных о геомагнитной обстановке, о потоке солнечного радиоизлучения, о тепловых аномалиях и данных об атмосферных аномалиях, модуль представления и доведения до потребителей результатов работы макета сервиса

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Mock-Up of Information Service for Automated Monitoring and Short-Term Forecasting of Severe Earthquakes in the Kamchatka-Sakhalin Region

O. A. Alekseev, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., centr31@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

S. A. Pulinets, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), pulse1549@mail.ru*
Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

P. A. Budnikov, *pavel9860@gmail.ru*
Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russian Federation

V. B. Serebriakov, *centr31@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

N. V. Razumova, *Cand. Sci. (Geography), Assoc. Prof.,*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. D. Lin'kov, *centr31@spacecorp.ru*
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the analysis of the development and control of the operation of the functional mock-up of the information service for automated monitoring and short-term forecasting of severe earthquakes in the Kamchatka-Sakhalin region. The tasks of the service mock-up concerning the collection, processing of data on earthquake precursors, the forecasting of severe (earthquake magnitude 6 or more) earthquakes in the form of estimates of the times of their onset, coordinates of epicenters (latitude and longitude) and earthquake magnitudes are determined. Taking the geoinformational character of the initial data on the approaching earthquakes as the basis for constructing the mock-up of the service, a geo-integration platform is proposed. This allows the integration of the information resources of the earthquake precursor monitoring systems, the functions of processing monitoring information into earthquake forecasts, the results of generating earthquake forecasts and their presentation to consumers into a single geoinformation environment. The composition of the service mock-up and the functioning of such elements as microservices are considered: collection and processing data from receivers of radio navigation signals of the GPS/GLONASS systems; collection and processing of data on the global distribution of TEC in the ionosphere; collection and processing of data on geomagnetic conditions, the flux of solar radio emission, thermal anomalies, as well as data concerning the atmospheric anomalies over the test site area and a unit for presenting and communicating the results of the operation of the information service mock-up for automated monitoring and short-term forecasting of severe earthquakes. The results of service operation are illustrated with the help of examples of retrospective forecasting of a number of severe earthquakes that occurred over the past 10 years in the Kamchatka-Sakhalin region, according to their precursors.

Keywords: functional mock-up of the information service for automated monitoring and short-term forecasting of severe earthquakes, microservice for collecting and processing data from receivers of radio navigation signals of GPS/GLONASS systems, microservice for collecting and processing data on the global distribution of TEC in the ionosphere, a microservice for collecting and processing data on the geomagnetic conditions, on the flow of solar radio emission, on thermal anomalies and data on atmospheric anomalies, module for presenting and communicating the results of the service mock-up to consumers

Введение

Своевременное и качественное краткосрочное прогнозирование сильных землетрясений, позволяющее заблаговременно, оперативно и надежно предупреждать о них органы власти и население сейсмоопасных регионов остается большой проблемой для человечества. Результативное решение задач раннего предупреждения о сильных землетрясениях в России и странах Содружества независимых государств (СНГ) рассматривается в рамках создаваемой Многоцелевой аэрокосмической системы прогнозного мониторинга (МАКСМ) чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера при комплексном использовании данных мониторинга предвестников землетрясений, получаемых средствами космического, авиационного и наземного базирования.

Одними из основных элементов МАКСМ по обработке результатов наблюдения предвестников сильных землетрясений (данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)) являются информационные сервисы мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений. Ведущиеся работы по обоснованию их создания привели к появлению научно-технического задела, позволившего сделать шаг к практической реализации этих сервисов — разработан и проверен в функционировании макет информационного сервиса автоматизированного мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений. Взаимодействие элементов макета информационного сервиса реализовано на единой геоинтеграционной платформе.

Целью данной статьи является рассмотрение решаемых задач, принципов построения, особенностей аппаратно-программной реализации и результатов функционирования макета информационного сервиса автоматизированного мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений на основе данных о предвестниках землетрясений, произошедших в Камчатско-Сахалинском регионе за последние 10 лет. Исходными данными для формирования ретроспективных прогнозов сильных землетрясений в этом наиболее сейсмичном регионе России стали находящиеся в открытом доступе данные об ионосферных предвестниках землетрясений.

Решаемые задачи

и принципы построения макета информационного сервиса автоматизированного мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений

Основными объектами рассмотрения на современном этапе создания МАКСМ ЧС природного и техногенного характера на территории России и стран СНГ являются информационные сервисы мониторинга и прогнозирования ЧС [1]. Важное место в составе информационных сервисов мониторинга и прогнозирования ЧС, наиболее опасных и распространенных на территории России и стран СНГ, занимают информационные сервисы мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений (с магнитудой 6 и более). Естественный этап создания этих сервисов — разработка их макета.

Разработанный макет информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений представляет собой информационную систему в виде взаимодействующих между собой, а также со средой подсистем (в аппаратно-программной реализации) и оператора с целью своевременного представления потребителям качественных прогнозов сильных землетрясений (рис. 1).

Макет информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений обеспечивает решение следующих целевых задач:

- сбор и загрузку данных мониторинга ионосферной обстановки над сейсмоопасными регионами, данных по геомагнитной обстановке, данных о потоке солнечного радиоизлучения, данных о тепловых аномалиях, данных об атмосферных аномалиях;

- валидацию и обработку ионосферных данных;
- многопараметрический анализ обнаруженных ионосферных аномалий и сравнение их параметров с параметрами других краткосрочных предвестников землетрясений, полученных по данным аэрокосмического и наземного мониторинга;



Рис. 1. Функциональная структура макета информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений

– оценку параметров прогнозируемых землетрясений по результатам анализа характеристик их краткосрочных предвестников на ближайшее время (несколько суток) в Камчатско-Сахалинском регионе.

Макет информационного сервиса обеспечивает полный цикл ввода, обработки и предоставления данных с максимальным уровнем автоматизации, включающий:

– ввод пространственных данных мониторинга краткосрочных предвестников землетрясений путем их импорта из существующих наборов данных или внешних гетерогенных источников данных;

– автоматизированную цифровую обработку данных аэрокосмического мониторинга и данных наземного мониторинга краткосрочных предвестников землетрясений;

– пространственное моделирование объектов мониторинга и пространственно-временной анализ их параметров;

– визуализацию исходных производных данных результатов их обработки;

– формирование и вывод созданных информационных массивов, в том числе в виде тематиче-

ских слоев цифровой информации, а также в табличной и (или) текстовой формах.

Управляющая подсистема с использованием интерфейсной среды обеспечивают оператору контроль и управление составом, структурой, параметрами и состояниями целевой и обеспечивающей подсистем сервиса (макета сервиса).

Обеспечивающая подсистема макета сервиса путем переработки ресурсов среды снабжает необходимыми ресурсами его целевую и управляющую подсистемы для решения ими целевых и управляющих задач.

Основными элементами среды, взаимодействующими с макетом сервиса по его целевому назначению, являются средства предоставления данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) о предвестниках сильных землетрясений от систем их мониторинга и средства предоставления потребителям сформированных в макете сервиса прогнозов сильных землетрясений. Примером таких средств являются средства сети Интернет.

Центральное место в структуре макета сервиса занимает целевая подсистема, включающая средства:

- сбора и хранения данных мониторинга предвестников землетрясений, сбора и хранения данных о произошедших сильных землетрясениях, об их предвестниках и сформированных прогнозах землетрясений;

- обработки информации о предвестниках сильных землетрясений и формирования их прогнозов;

- представления потребителям данных о прогнозах сильных землетрясений.

Формирование прогнозов сильных землетрясений основано на реализации подхода, заключающегося в комплексном учете взаимосвязей и проявлении происходящих в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли процессов (предвестников), предшествующих сильным землетрясениям [2].

Входная и выходная информация макета сервиса имеет геоинформационный характер — параметры предвестников являются функциями географических координат и времени. Поэтому в качестве основы построения макета сервиса предложена геоинтеграционная платформа (ГИП), позволяющая в единой геоинформационной среде объединять [3]:

- информацию о предвестниках сильных землетрясений (интегрировать информационные ресурсы систем ДЗЗ);

- функции переработки этой информации в прогнозы землетрясений;

- результаты представления прогнозов потребителям.

Аппаратно-программная реализация макета информационного сервиса автоматизированного мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений

Аппаратно-программная реализация макета информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений основана на архитектуре в виде микросервисов сбора и обработки информации о предвестниках землетрясений, взаимодействующих с модулем представления и доведения до потребителей результатов работы макета сервиса на выбранном тестовом участке территории России. Взаимодействие элементов макета сервиса осуществляется на единой ГИП. Выбранную архитектуру отражает структурная схема макета информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений (рис. 2).

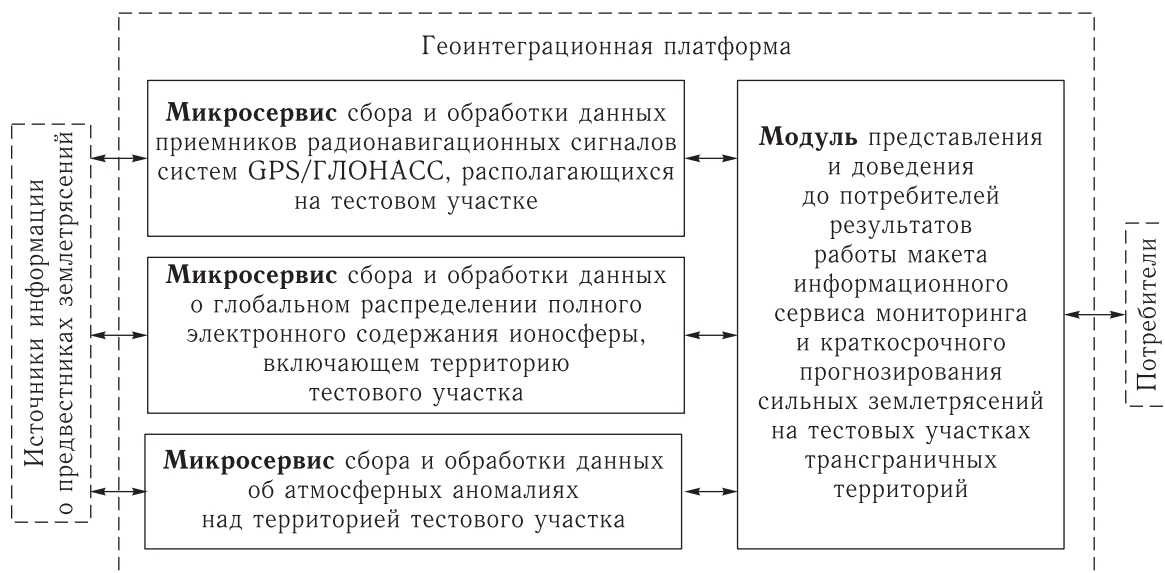


Рис. 2. Структурная схема макета информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений

Микросервис сбора и обработки данных приемников радионавигационных сигналов систем GPS/ГЛОНАСС, располагающихся на тестовом участке, предназначен для выявления аномальных вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере над приемниками с целью определения времени наступления сейсмического события.

Микросервис сбора и обработки данных о глобальном распределении ПЭС в ионосфере, включающем территорию тестового участка, предназначен для выявления аномальных вариаций ПЭС в ионосфере по широте и долготе в границах тестового участка с целью определения координат эпицентра прогнозируемого землетрясения и его магнитуды.

Микросервис сбора и обработки данных о геомагнитной обстановке, о потоке солнечного радиационного излучения, о тепловых аномалиях и данных об атмосферных аномалиях над территорией тестового участка предназначен для получения дополнительной информации о предвестниках землетрясений с целью уточнения параметров прогнозов землетрясений, полученных по результатам мониторинга ионосферных предвестников.

Модуль представления и доведения до потребителей результатов работы макета информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений на тестовых участках трансграничных территорий предназначен для:

- сбора и хранения данных о предвестниках землетрясений, о произошедших сильных землетрясениях и результатах их прогнозов;
- визуализации данных о предвестниках землетрясений, сформированных микросервисами, и картографической их привязки к тестовым участкам;
- обеспечения информационной поддержки оператора при формировании прогноза землетрясения при выборе им данных в виде совокупности различных (в том числе картографических) слоев и объектов с атрибутивной информацией;
- формирования отчетов о результатах прогнозов землетрясений для предоставления их потребителям.

В микросервисе сбора и обработки данных приемников радионавигационных сигналов систем GPS/ГЛОНАСС, располагающихся на тестовом участке, реализован алгоритм, включающий:

- загрузку данных приемников радионавигационных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС в виде файлов наблюдения и файлов навигации в формате RINEX [4]. Разархивирование данных приемников с применением специализированных программ, например, WinRAR, 7-Zip, gzip. Преобразование файлов наблюдения в формате RINEX из архива Hatanaka (с расширением «d») в обычный формат (с расширением «o») с применением специализированной программы CRX2RNX.exe;

- восстановление значений вертикального ПЭС в ионосфере над приемниками радионавигационных сигналов GPS/ГЛОНАСС по файлам наблюдения RINEX и навигации с использованием программы Ciraolo_2013.rag на основе алгоритма L. Ciraolo [5];

- определение отклонений вертикального ПЭС в ионосфере ΔTEC над точками расположения приемников радионавигационных сигналов GPS/ГЛОНАСС с выбранным временным разрешением по формуле:

$$\Delta TEC = 100(TEC - TEC_A)/TEC_A, \quad (1)$$

где TEC — текущее значение вертикального ПЭС в ионосфере в фиксированный момент времени, размерность единицы вертикального ПЭС в ионосфере: $TECU = 10^{16}$ эл/м²;

TEC_A — скользящее среднее значение вертикального ПЭС в ионосфере, вычисленное по выбранному числу предшествующих значений вертикального ПЭС в ионосфере для того же момента времени;

- формирование матриц значений ΔTEC для точек с заданными географическими координатами, выбранного временного интервала по суткам и часам с заданным шагом;

- определение коэффициентов корреляции процессов $TEC_i(t)$ и $TEC_j(t)$, $i \neq j$, по данным выбранных пар приемников радионавигационных сигналов, размещенных на тестовом участке.

Полученные матрицы значений отклонений вертикального ПЭС в ионосфере ΔTEC используются в модуле представления и доведения до потребителей результатов работы макета информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений для построения

«масок» предвестников землетрясений на тестовом участке. «Маски» предвестников землетрясений и графики изменения коэффициентов корреляции процессов $TEC_i(t)$ и $TEC_j(t)$ применяются оператором для формирования прогнозов моментов времени наступления землетрясений.

В микросервисе сбора и обработки данных о глобальном распределении ПЭС в ионосфере реализован алгоритм, включающий:

- загрузку данных глобальных ионосферных карт абсолютного вертикального ПЭС в ионосфере — Global Ionospheric Maps (GIM) в формате IONEX [6] над тестовым участком;

- вычисление исходных данных для построения разностных карт вариаций глобального вертикального ПЭС в ионосфере:

$$\Delta TEC_{GIM} = TEC_{GLM} - TEC_{GIMA}, \quad (2)$$

где ΔTEC_{GIM} — отклонение текущего значения вертикального ПЭС в ионосфере TEC_{GIM} от фонового значения TEC_{GIMA} ; в качестве фонового значения TEC_{GIMA} используется среднее значение вертикального ПЭС в ионосфере, рассчитанное по выбранному числу предшествующих значений TEC_{GIM} для того же момента времени. Отклонение ΔTEC_{GIM} от фоновых значений TEC_{GIMA} выражается в единицах значений вертикального ПЭС в ионосфере: $TECU = 10^{16}$ эл/м²;

- формирование матриц значений ΔTEC_{GIM} для выбранного участка территории и выбранных моментов времени наблюдения вариаций вертикального ПЭС в ионосфере.

Полученные матрицы вариаций вертикального ПЭС в ионосфере ΔTEC_{GIM} предназначены для использования в модуле представления и доведения до потребителей результатов работы макета информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений для определения оператором магнитуд и координат эпицентров землетрясений на выбранном участке территории. Магнитуда прогнозируемого землетрясения определяется оператором с использованием средств модуля по величине радиуса построенной оператором окружности вокруг области аномальных вариаций вертикального ПЭС ионосферы над тестовым участком. Координатами эпицентра прогнози-

руемого землетрясения являются широта и долгота центра построенной оператором окружности.

Связь величины радиуса окружности R (в километрах) и магнитуды землетрясения M задается формулой И. П. Добровольского [7]:

$$R = 10^{0,43M}. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что

$$M = \frac{\lg(R)}{0,43}. \quad (4)$$

В микросервисе сбора и обработки данных о геомагнитной обстановке, о потоке солнечного радиоизлучения, о тепловых аномалиях и данных об атмосферных аномалиях над территорией тестового участка реализован алгоритм, включающий:

- загрузку данных о гелиогеомагнитной обстановке (индексы Ap, Kp, Dst) и данных о потоке солнечного радиоизлучения (F10.7) [8, 9];

- загрузку метеорологических данных (температура и влажность атмосферного воздуха) для выбранных точек тестового участка, например точек расположения приемников радионавигационных сигналов [10];

- вычисление поправки химического потенциала паров воды в атмосфере $\Delta U(eV)$ над выбранными точками тестового участка по формуле [11]:

$$\Delta U(eV) = 5,8 \cdot 10^{-10} (20T_g + 5463)^2 \ln(100/B), \quad (5)$$

где T_g — температура воздуха у поверхности Земли выбранной точки тестового участка;

B — относительная влажность воздуха у поверхности Земли выбранной точки тестового участка;

- формирование пространственного распределения значений поправки химического потенциала паров воды в атмосфере $\Delta U(eV)$ в пределах тестового участка и выбранного временного интервала по суткам и часам.

Полученные карты поправки химического потенциала паров воды в атмосфере $\Delta U(eV)$ используются в модуле представления и доведения до потребителей результатов работы макета информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений для уточнения оператором полученных ранее значений моментов времени наступления землетрясений, координат их эпицентров и магнитуд землетрясений.

Технические средства микросервисов в составе макета сервиса (клиентская часть) содержат от двух и более ПЭВМ с характеристиками (не хуже): процессор Intel Atom D2550 1.86 GHz; оперативная память 2048 Мбайт; жесткий диск емкостью 250 Гбайт; видеокарта с памятью 256 Мбайт; сетевая карта Ethernet 100/1000 Мбит/с; операционная система MS Windows с интернет-браузером (Chrome, Firefox), поддерживающим технологии AJAX, HTML5.

Технические средства модуля в составе макета сервиса (серверная часть) содержат сервер (ПЭВМ или VPS) с характеристиками (не хуже): процессор Intel Core i5-6600 3,3 GHz; оперативная память 4096 Мбайт; жесткий диск емкостью 1 Тб; сетевая карта Ethernet 100/1000 Мбит/с; операционная система MS Windows Server; канал связи между клиентской и серверной частями с пропускной способностью не менее 10 Мбит/с.

Результаты функционирования макета информационного сервиса на примере мониторинга предвестников и ретроспективного краткосрочного прогнозирования произошедших сильных землетрясений в Камчатско-Сахалинском регионе

Функционирование макета информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений было проверено путем ретроспективного прогнозирования сильных землетрясений, произошедших в Камчатско-Сахалинском регионе в период с 2011 по 2019 гг., на основе ряда оперативных данных в открытом доступе. Этот регион был выбран вследствие того, что он является наиболее сейсмичным регионом России как по частоте, так и по интенсивности сейсмических событий.

В качестве тестового участка (его границы — красная штриховая линия на рис. 3) для проверки функционирования макета сервиса был определен участок, ограниченный координатами 40° – 65° с. ш.

и 120° – 180° в. д. К участку относятся зоны на территориях, входящих в состав Магаданского, Чукотского и Дальневосточного округов Российской Федерации, а также на части территорий Командорских островов и северной Японии.

В границах выбранного участка располагаются 5 приемников сигналов систем ГЛОНАСС/GPS, входящих в состав международной службы International GNSS Service (IGS), с открытым доступом к результатам их функционирования.

Было выбрано 17 временных интервалов с информацией о вертикальном ПЭС ионосферы над тестовым участком, принадлежащих временному периоду 2011–2019 гг. Среди выбранных временных интервалов 10 временных интервалов содержали информацию о 18 сильных, с магнитудой 6 и более землетрясениях (от одного до четырех землетрясений на интервале), а 7 временных интервалов такой информации не содержали.

В качестве данных для прогнозирования землетрясений оператору, не осведомленному о датах и параметрах произошедших землетрясений представлялись визуализированные в модуле макета сервиса результаты работы микросервисов по исходным данным открытого доступа:

- формируемые по результатам обработки данных глобальных ионосферных карт GIM цветные изображения вариаций вертикального ПЭС ионосферы по широте и долготе над тестовым участком;

- формируемые по результатам обработки радионавигационных сигналов ГЛОНАСС/GPS, принятых приемниками, цветные изображения вариаций вертикального ПЭС ионосферы над выбранным приемником в системе координат сутки–часы местного времени (далее — «маски»);

- графики изменения во времени коэффициентов корреляции вариаций вертикального ПЭС ионосферы над выбранными парами приемников, располагающимися на тестовом участке.

Прогнозы землетрясений формировались оператором в результате проводимого им анализа предоставляемых ему последовательно во времени описанных выше данных.

Примеры ряда исходных данных ретроспективного прогнозирования сильного землетрясения, произошедшего 30.01.2016 г. в 03:25:09 на Камчат-

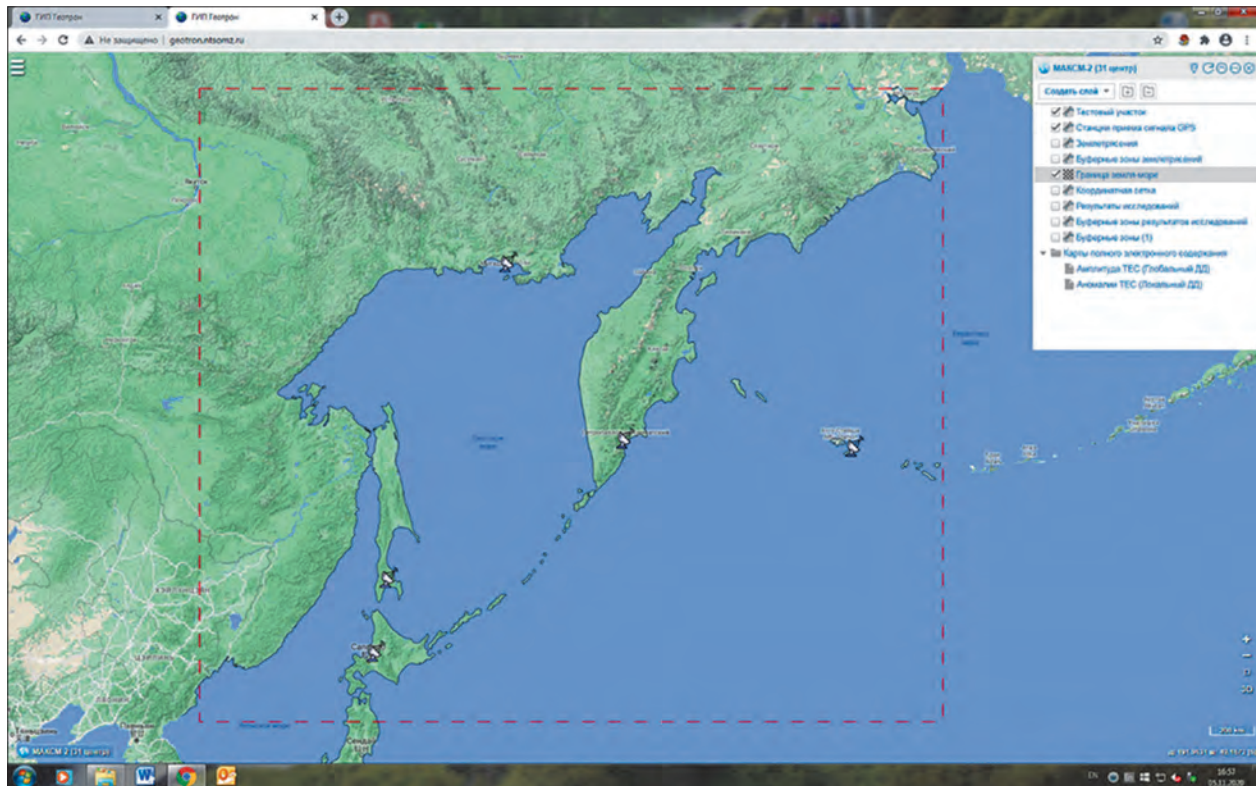


Рис. 3. Изображение тестового участка (красная пунктирная линия) на главном экране представления результатов прогнозов землетрясений

ском полуострове в 70 км от г. Петропавловска-Камчатского (магнитуда землетрясения 7,2; глубина — 159 км; координаты его эпицентра: широта — $54,03^\circ$ с. ш., долгота — $158,54^\circ$ в. д.), приведены на рис. 4–7. В научной литературе это землетрясение получило название Жупановского [12] и исследовалось достаточно подробно в различных аспектах его проявления.

Оператором при наблюдении данных с 17.01.2016 г. по 24.01.2016 г. была объявлена тревога предстоящего землетрясения (с привязкой к дате — 24.01.2016 г.) на основании:

- появления (рис. 4, *з*) области значительной положительной аномалии (красный цвет) вариации вертикального ПЭС ионосферы 24.01.2016 г. над южной частью Камчатского полуострова;

- появления (рис. 5) значительной положительной аномалии (желтый цвет) вертикального ПЭС ионосферы по данным приемника в г. Петропавловске-Камчатском в ночь с 21.01.2016 г. на 22.01.2016 г. и резкого уменьшения вертикаль-

ного ПЭС ионосферы (темно-синий цвет) к ночи 23.01.2016 г.;

- резких изменений (рис. 6, *а и б*) с 21.01.2016 г. по 22.01.2016 г. значений коэффициентов корреляции вариаций вертикального ПЭС ионосферы над двумя парами приемников.

Оператором (с привязкой к дате — 24.01.2016 г.) был сформирован прогноз землетрясения:

- время наступления прогнозируемого землетрясения — через 5–10 дней после начала проявлений аномалий вариаций вертикального ПЭС ионосферы над тестовым участком (отсчет от 21.01.2016 г.), т.е. период с 26.01.2016 г. по 31.01.2016 г.;

- магнитуда прогнозируемого землетрясения определена равной 7,07, что соответствует радиусу построенной оператором окружности 1100 км на карте тестового участка (обозначена на рис. 7 темным цветом). Окружность охватывает область положительной аномалии вертикального ПЭС

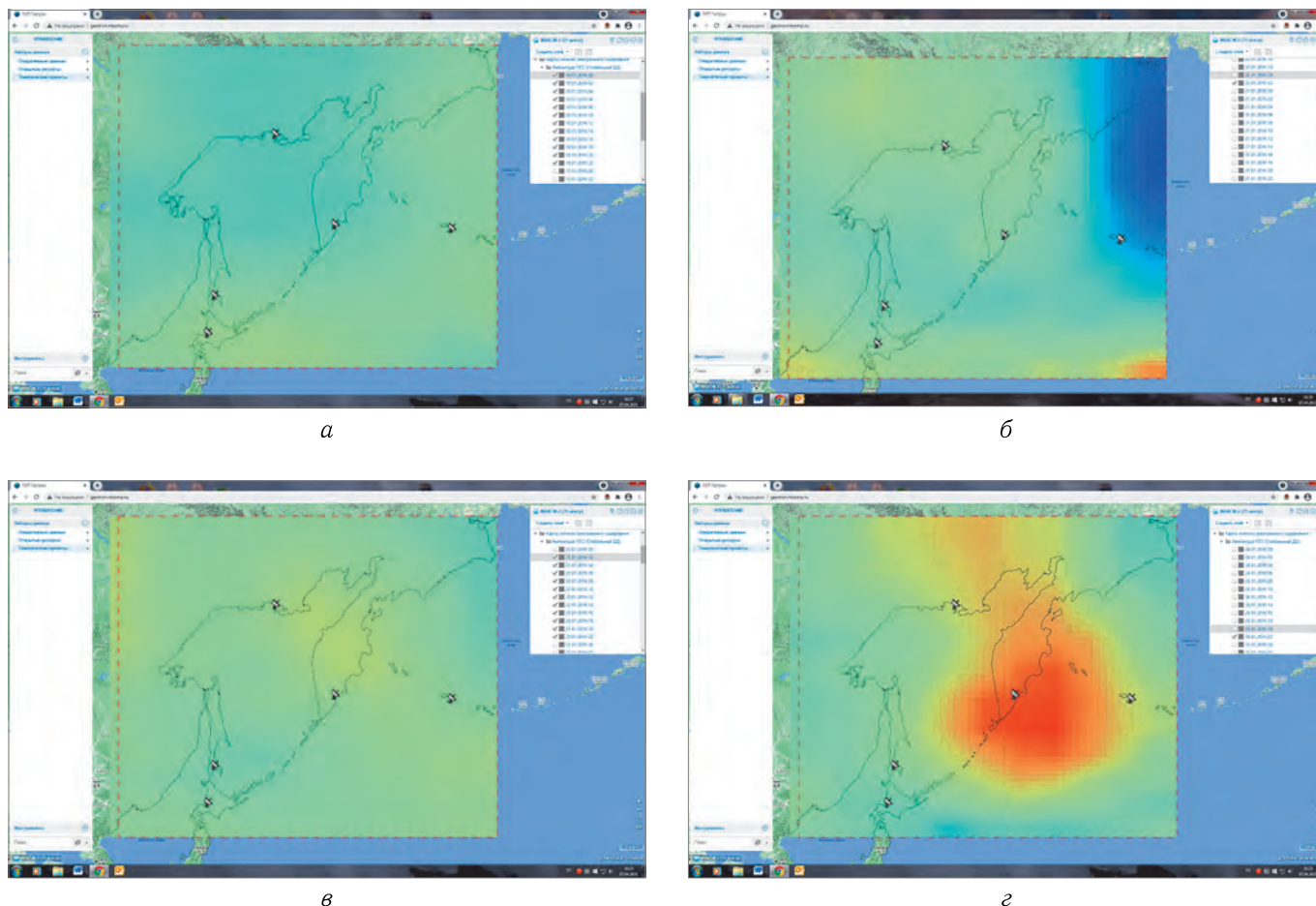


Рис. 4. Изображения распределений вариаций вертикального ПЭС ионосферы по широте и долготе над тестовым участком в абсолютных значениях по времени и датам: а) 00:00 18.01.2016 г.; б) 22:00 22.01.2016 г.; в) 02:00 23.01.2016 г.; з) 22:00 24.01.2016 г.

ионосферы (красный, оранжевый, желтый цвета). Положение эпицентра определяется как геометрический центр положительной аномалии (центр окружности), формирующейся над областью подготовки землетрясения. Магнитуда оценивается по величине радиуса окружности согласно формуле (4);

– координаты эпицентра прогнозируемого землетрясения — 53° с. ш. и $159,7^{\circ}$ в. д., соответствуют красной точке (рис. 7), являющейся центром окружности, построенной оператором вокруг области аномальных вариаций вертикального ПЭС ионосферы над тестовым участком.

На рис. 7 приведена окружность желтого цвета с радиусом 1247 км, соответствующая размеру истинной области аномальных вариаций вертикального ПЭС ионосферы (выражение (3)) про-

изошедшего на территории тестового участка землетрясения. Положение центра этой окружности (желтая точка) соответствует истинным координатам эпицентра произошедшего землетрясения.

Приведенные значения параметров ретроспективного прогноза сильного землетрясения 30.01.2016 г. позволяют считать данный прогноз успешным, поскольку они соответствуют техническим требованиям, изложенным в техническом задании на проведение исследований, результатом которых стала разработка и испытание макета информационного сервиса автоматизированного мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений в Камчатско-Сахалинском регионе:

– погрешности в определении широты и долготы эпицентра не должны превышать 2° ;

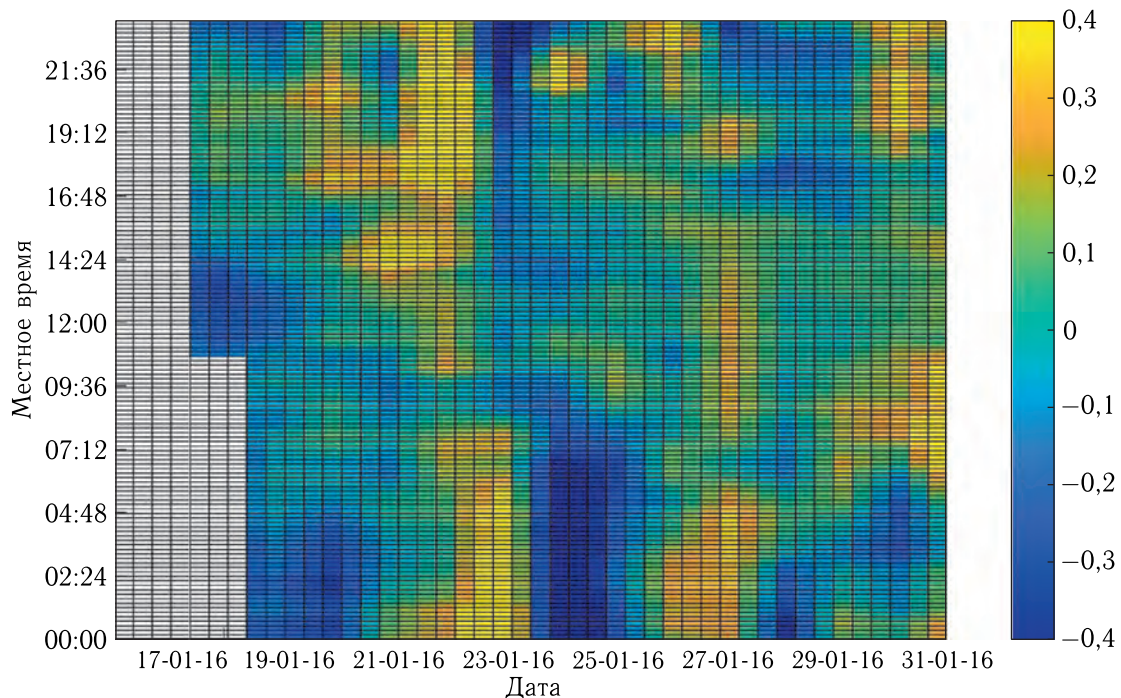


Рис. 5. «Маска» землетрясения, произошедшего 30.01.2016 г. в 03:25:09, построенная по данным приемника в г. Петропавловске-Камчатском

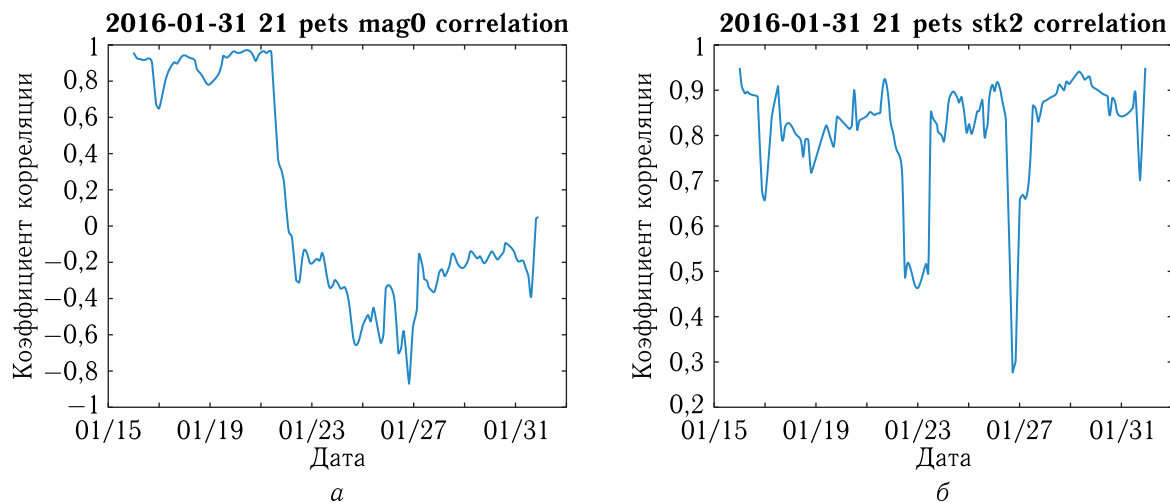


Рис. 6. Графики изменения во времени коэффициентов корреляции вариаций вертикального ПЭС ионосферы над парами приемников: а) в г. Петропавловске-Камчатском и в г. Магадане; б) в г. Петропавловске-Камчатском и на одном из Командорских островов

– погрешность определения магнитуды землетрясения по шкале Рихтера не должна превышать 0,7 баллов;

– время упреждения прогноза землетрясения относительно основного события должно быть в диапазоне от 1 до 10 суток.

Подобным образом оператором были проанализированы визуализированные данные, принадлежащие другим 16 временным интервалам. Успешно были спрогнозированы еще 11 сильных землетрясений. Отношение числа успешно спрогнозированных землетрясений (12) к числу имевших

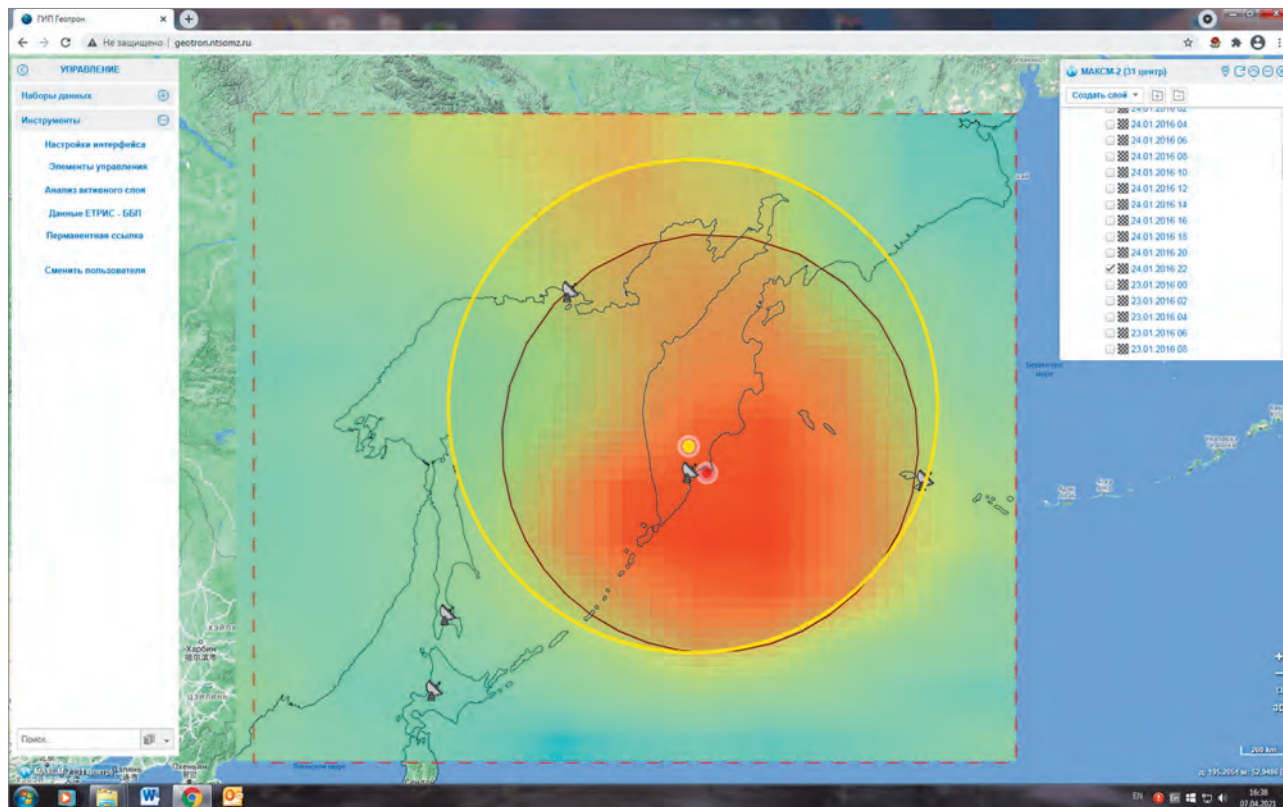


Рис. 7. Изображение распределения вариаций вертикального ПЭС ионосферы по широте и долготе над тестовым участком в относительных значениях для момента времени 22:00 24.01.2016 г.

место сильных землетрясений на тестовом участке в рассматриваемый временной период (18) составило 0,67, что удовлетворяет требованию технического задания на проведение исследований — значение вероятности прогноза землетрясения должно быть не менее 0,65.

Заключение

Разработан макет информационного сервиса мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных (с магнитудой 6 и более) землетрясений. В состав макета входят микросервисы сбора и обработки данных об ионосферных и других предвестниках землетрясений и модуль представления и доведения результатов работы макета сервиса до потребителей. Взаимодействие элементов макета сервиса осуществляется на единой геоинтеграционной платформе.

Разработанный макет сервиса позволяет решать задачи формирования краткосрочных прогнозов сильных землетрясений в Камчатско-Сахалинском регионе по данным ионосферных и других предвестников землетрясений и может служить основой для создания информационных сервисов мониторинга и краткосрочного прогнозирования сильных землетрясений в составе МАКСМ.

Список литературы

1. Алексеев О.А., Серебряков В.Б., Тищенко П.А., Разумова Н.В., Линьков А.Д. Методологические аспекты создания сервисов многоцелевой аэрокосмической системы прогнозного мониторинга чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7, вып. 2. С. 39–49.
2. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В. Прогноз землетрясений возможен?! Интегральные

- технологии многопараметрического мониторинга геоэффективных явлений в рамках комплексной модели взаимосвязей в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли. М.: Тривант, 2014, 144 с.
3. *Alekseev O.A., Perminov A.N., Serebriakov V.B., Razumova N.V., Linkov A.D.* Geo-integration bases of services generation for the Multipurpose aerospace system for forecasting monitoring of disasters // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 862. 2020. 052064. P. 1–5.
 4. Данные приемников глобальных навигационных спутниковых систем (GPS/ГЛОНАСС) в формате RINEX. Электрон. дан. URL: <ftp://garner.ucsd.edu/archive/garner/rinex> (Дата обращения 01.02.2021).
 5. *Ciraolo L.* GNSS Derived TEC Data Calibration // Workshop on Science Applications of GNSS in Developing Countries. April 23, 2012. Trieste.
 6. Глобальные ионосферные карты (GIM — Global Ionospheric Maps) ПЭС в формате IONEX. Электрон. дан. URL: <ftp://cddis.nasa.gov/gps/products/ionex> (Дата обращения 01.12.2021).
 7. *Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Myachkin V.I.* Estimation of the size of the earthquake preparation zones Pure and Applied Geophysics. 1979. 117. P. 1025–1044.
 8. Данные о геомагнитной обстановке (индексы Ap, Kp и Dst). Электрон. дан. URL: <https://www.gfz-potsdam.de> (Дата обращения 01.02.2021).
 9. Данные о потоке солнечного радиоизлучения (F10.7). Электрон. дан. URL: ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices (Дата обращения 01.02.2021).
 10. Метеорологические данные (температура и влажность атмосферного воздуха). Электрон. дан. URL: <https://meteoinfo.ru/archive-pogoda> (Дата обращения 01.02.2021).
 11. *Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В.* Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, стимулируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, вып. 4. С. 521–538.
 12. *Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Дрознина С.Я., Иванова Е.И., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Раевская А.А., Салтыков В.А., Сенюков С.Л., Серафимова Ю.К., Скоркина А.А., Титков Н.Н., Чебров Д.В.* Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. С $KS = 15.7$, $MW = 7.2$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. Вып. 1. С. 5–19.