

Геоинформационная платформа мониторинга геофизических полей, прогноза землетрясений и исследования сейсмогенных процессов

В.Г. Гитис, А.Б. Дерендяев, К.Н. Петров, М.А. Витушко

Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия
Поступила в редколлегию 06.03.2023

Аннотация—В работе описана платформа мониторинга и анализа сейсмогенных процессов. Платформа состоит из двух обособленных ГИС. Первая — сетевая ГИС Prognosis, которая скачивает и обрабатывает данные с удалённых серверов, а также проводится систематический прогноз землетрясений и подготовка проекта для дальнейшего анализа. Вторая — стационарная ГИС GeoTime 3, представляет возможности для подробных исследований подготовленных в ГИС Prognosis данных. В статье приведены примеры анализа данных на данной платформе. В ГИС Prognosis продемонстрирована возможность систематического наблюдения за сейсмологической обстановкой на примере Калифорнии. В ГИС GeoTime проведено сравнение эффективности методов оценивания полей плотности эпицентров землетрясений при прогнозе землетрясений на территории Камчатки и показано, что применение адаптивного весового сглаживания даёт лучший результат среди остальных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГИС, машинное обучение, прогноз землетрясений, временные ряды, пространственно-временные поля, метод минимальной области тревоги.

DOI: 10.53921/18195822_2023_23_1_168

1. ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг сейсмогенных процессов применяется для наблюдения, оценивания и прогноза землетрясений. Наблюдениями сейсмического мониторинга являются поля эпицентров землетрясений по всему миру, параметры их механизмов землетрясений и записи сейсмограмм, Эти данные в реальном времени предоставляют ряд сайтов. Для некоторых регионов доступны детальные данные космической геодезии о смещениях поверхности Земли. Каждое из этих наблюдений характеризуют отдельное землетрясение, а совокупность этих наблюдений качественно представляет поведение сейсмического процесса. Для более глубокого анализа сейсмического и геодинамического процессов и прогноза землетрясений требуется выделить из этих данных особые прогностические свойства, определить для выделенных свойств правило принятия решения и указать время, место и силу ожидаемого землетрясения. Решение этих задач связано с обработкой больших объемов разнотипных пространственных и пространственно-временных данных. Особенности таких данных требуют применения специализированных методов и технологий, которые реализуются в ГИС.

Землетрясения являются одними из самых опасных природных явлений [1]. Известно [2,3], что землетрясению предшествуют процессы, формирующие аномальные изменения геологической среды в области очага ожидаемой катастрофы. Это является основанием предположения о том, что землетрясение может быть предсказано по локальным изменениям геологической среды.

Трудность прогноза землетрясений обусловлена неполнотой информации и сложностью исследуемых процессов. Поэтому некоторые исследователи считают, что предсказание землетрясений невозможно [4, 5, 6].

Существуют два подхода к проблеме прогноза землетрясений. Первый основан на физике сейсмологических и геодинамических процессов, а второй основан на выявлении статистических свойств произошедших сильных землетрясений. Первый подход, нуждается в том, чтобы модели подготовки очага землетрясения определялись количественными показателями, доступными для инструментальных измерений. Статистические методы прогноза требуют совершенствования сети мониторинга сейсмических и геодинамических процессов, увеличения типов инструментальных наблюдений и повышения их точности. Для преодоления этой неопределенности в настоящее время для прогноза землетрясений широко используются методы машинного обучения [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. В ряде работ для прогноза используются искусственные нейронные сети [15, 16, 17], а также их гибридные и рекуррентные модификации [18, 19]. Эти методы требуют для обучения достаточно больших выборок целевых событий. В то же время известно, что для ряда сейсмически активных регионов количество сильных сейсмических событий на интервалах обучения невелико. Поэтому, некоторые более простые модели могут иметь аналогичные или лучшие предсказательные возможности.

Рассматриваемая в статье технология мониторинга сейсмических процессов и систематического прогноза землетрясений реализована в виде новой версии сетевой платформы <https://gis.iitp.ru/prognosis-gps/>. Ранее основные принципы технологии рассматривались в [20, 21]. Основное отличие состоит в том, что в новой версии мониторинг и прогноз ведутся не только с данными каталогов землетрясений, но и с данными космической геодезии о смещениях поверхности Земли. Платформа состоит из двух ГИС. Первая в автоматическом режиме ведёт мониторинг сейсмогенных полей, выполняет систематический прогноз землетрясений в нескольких сейсмически активных регионах и позволяет анализировать сейсмические процессы с помощью интуитивно понятных картографических инструментов. Вторая ГИС предназначена для научных исследований пространственно-временных сейсмологических процессов, включая процессы, относящиеся к прогнозу землетрясений.

В разделе 2 рассматривается подход к систематическому прогнозу землетрясений. Раздел 3 представляет структуру и инструментальные средства ГИС платформы. В разделе 4 мы рассматриваем примеры проведения исследований в области систематического прогноза землетрясений.

2. ТЕХНОЛОГИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Развиваемая нами схема систематического прогноза землетрясений [22] состоит в следующем. Прогноз выполняется в заранее выбранной зоне анализа регулярно. Временной интервал, на который даётся прогноз, является постоянным. Систематический прогноз во времени состоит в определении интервала тревоги, на котором в зоне анализа ожидается землетрясение с целевой магнитудой (в частном случае все интервалы прогноза можно объявить интервалами тревоги). Систематический прогноз во времени и в пространстве состоит в определении временного интервала тревоги и в определении на интервале тревоги зоны тревоги, в которой ожидается эпицентр целевого землетрясения. В первом случае землетрясение успешно предсказано, если оно произошло на интервале тревоги, а во втором случае землетрясение предсказано, если его эпицентр на интервале тревоги попал в зону тревоги. Точность предсказания определяется величиной интервала тревоги и площадью зоны тревоги.

В данной работе, как и в [20, 23, 24, 25, 26] мы используем упрощенную схему прогноза, в которой каждый интервал прогноза считается интервалом тревоги. Система прогноза работает с шагом Δt . На каждом шаге Δt с удаленных серверов загружаются новые исходные данные

о сейсмическом процессе и дополняется выборка эпицентров целевых землетрясений. Данные обрабатываются и преобразуются в однотипные сеточные пространственно-временные поля.

Машинное обучение и прогноз осуществляются с помощью разработанного нами метода минимальной области тревоги [23, 24, 25]. Свойства (признаки) исследуемого процесса мы представляем с помощью унифицированных пространственно-временных сеточных полей. Значениям полей в узлах сетки соответствуют векторы признаков. Обучение выполняется перед каждым прогнозом по всем имеющимся ретроспективным данным. Алгоритм обучения использует специальную меру аномальности значений компонент векторов признаков. Модель метода предполагает, что векторы с высокой мерой аномальности могут предшествовать эпицентрам землетрясений $m \geq M$, где M — заданная магнитуда целевых землетрясений.

Алгоритм обучения находит в ретроспективных данных один или несколько таких аномальных векторов для каждого эпицентра землетрясений $q = 1, 2, \dots, Q$. Эти векторы мы называем предвестниками землетрясений. Можно сказать, что предвестник является аномалией (аномальным значением векторного поля), которая предшествует близкому (в пространственно-времени) целевому событию с магнитудой $m \geq M$. По векторам предвестников землетрясений, полям признаков и с учетом положения узлов координатной сетки полей признаков в пространстве и во времени алгоритм обучения вычисляет пространственно-временное поле тревоги.

Алгоритм работает следующим образом. Вначале он выбирает предвестник с наивысшей мерой аномальности из всех n предвестников учебной выборки. Для этого предвестника алгоритм находит множество узлов сетки A_1 в определенном смысле сходное с вектором признаков данного предвестника. Всем узлам сетки множества A_1 присваивается значение функции v_1 , равное выбранному числу узлов. Далее алгоритм выбирает вектор признаков с наибольшей мерой аномальности среди оставшихся и находит для него множество сходных узлов сетки A_2 . Множеству узлов сетки $A_2 \setminus A_1$ присваивается значение v_2 , равное числу узлов сетки в объединении множеств $A_1 \cup A_2$. При повторении этой процедуры для следующего предвестника мы получаем множество узлов сетки $A_3 \setminus (A_1 \cup A_2)$, которым присваивается значение v_3 , равное числу узлов сетки в объединении множеств $(A_1 \cup A_2 \cup A_3)$. Таким образом, алгоритм вычисляет в пространственно-временных координатах функцию, значения которой $v_1 \leq v_2 \leq \dots \leq v_n$ равны количеству узлов сетки в объединениях множеств, относящихся ко всем n предвестникам землетрясений учебной выборки. Узлам сетки, которые не попали в объединение множеств $(A_1 \cup A_2, \dots, \cup A_n)$, присваивается значение N , равное числу узлов сетки во всей области анализа в пространстве и во времени. Поле тревоги принимает значения $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, 1$

$$\varphi_m = v_m/N, m = 1, 2, \dots, (n + 1) \quad (1)$$

Можно видеть, что значения поля тревоги определяют упорядоченные по некоторому эвристическому правилу объединения множеств узлов сетки. Значения тревоги, меньшие или равные некоторого заданного порога, определяют область тревоги, в которой ожидается эпицентр целевого землетрясения. При этом область тревоги содержит в основном узлы сетки, в которые ожидаемые эпицентры не попадут. Объём тревоги φ равен доле узлов сетки в области тревоги. Поэтому, значение поля тревоги является оценкой вероятности того, что в данной области тревоги эпицентр целевого землетрясения не ожидается. Поэтому в некоторых случаях мы называем значения поля тревоги оценками вероятностей ложной тревоги.

Временной срез поля тревоги в момент прогноза t^* определяет карту тревоги на интервал прогноза $(t^*, t^* + T]$. Целевое землетрясение предсказано, если на данном интервале его эпицентр попадает в зону тревоги.

Качество систематического прогноза можно оценивать по двум типам критериев. Для практического использования результатов требуется введение оценки успешности отдельного прогноза. Такими оценками являются, например, оценка вероятности того, что на данном интер-

вале тревоги в зоне анализа действительно произойдет хотя бы одно целевое событие и оценка вероятности того, что целевые события произойдут на интервале тревоги и все они попадут в зону тревоги. Близкая постановка задачи рассматривалась в [26].

Для сравнения алгоритмов обучения и определения эффективности полей признаков используются интегральные оценки качества прогноза. Мы для этой цели используем оценку вероятности обнаружения эпицентров целевых землетрясений и долю средней площади зоны тревоги от площади зоны анализа. Оценка вероятности обнаружения целевых событий определяется, как доля числа обнаруженных целевых событий Q^* , от числа всех целевых событий

$$U = Q^*/Q. \quad (2)$$

Объем тревоги равен доле средней площади зоны тревоги от площади зоны анализа

$$V = S_{\text{ср}}/S, \quad (3)$$

где $S_{\text{ср}} = (\sum_{n=1}^N S_n)/N$, S_n — площадь зоны тревоги при n -м прогнозе, $S_{\text{ср}}$ — величина средней площади зоны тревоги, S — площадь зоны анализа, N — число интервалов прогноза.

Очевидно, чем больше средний размер площади зоны тревоги $S_{\text{ср}}$, тем больше вероятность обнаружения целевых событий случайным полем и тем меньше оценка вероятности обнаружения событий, вычисленная в результате обучения, отличается от величины V . Поэтому очевидно, что площадь $S_{\text{ср}}$ следует ограничивать.

При принятии решения по обнаружению целевых событий возникают два типа ошибок: ошибки, обусловленные пропуском целевых событий, и ошибки, связанные с размером зоны тревоги. Оценка вероятности ошибок пропуска целевых событий равна $(1 - U)$. Относительная величина площади зоны тревоги определяется объемом тревоги V . Объем тревоги будем считать оценкой вероятности ложной тревоги.

3. ПЛАТФОРМА СИСТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

3.1. Архитектура

Мониторинг опасных природных процессов включает в себя регулярное наблюдение процессов, выявление их ключевых характеристик, прогноз ожидаемых опасных явлений, а также исследование факторов формирования опасных явлений и анализ моделей прогноза. Рассматриваемая платформа совмещает в себе два уровня анализа данных. Первый уровень в автоматическом режиме осуществляет мониторинг сейсмогенных процессов и регулярный прогноз землетрясений. Результаты, полученные на первом уровне, и инструменты, предназначенные для их анализа, доступны для широкого класса пользователей. Второй уровень предназначен для исследований, связанных с анализом пространственно-временных процессов и прогнозом землетрясений. Для этого специалисту доступен широкий набор инструментов комплексного анализа пространственных и пространственно-временных данных.

Два уровня анализа данных удобно реализовать с помощью двух сетевых ГИС. Первая ГИС обеспечивает пользователя инструментами анализа процессов с интуитивно понятными операциями и упрощенным интерфейсом. ГИС работает с постоянным шагом. На каждом шаге она автоматически загружает и обрабатывает исходные данные, обучается, вычисляет карту прогноза землетрясений и готовит ГИС-проект, содержащий используемые для прогноза по исследуемому региону данные на интервале от начала обучения до текущего момента. Вторая ГИС является многофункциональной системой, ориентированной на анализ пространственно-временных процессов. Эта ГИС запускается с подготовленным ГИС-проектом. Наряду со стандартными операциями, ГИС второго уровня может обеспечить динамическую загрузку и ин-

теграцию данных с удаленных серверов и локальной сети пользователя, а также обладает большим набором специальных инструментов для совместного анализа разнотипных пространственных и пространственно-временных данных.

Первая версия демонстрационной платформы мониторинга и прогноза описана в [20]. Вторая версия доступна на сайте <https://gis.iitp.ru/prognosis-gps/>. Первый уровень анализа обеспечивает ГИС Prognosis, а второй уровень анализа поддерживается с помощью ГИС GeoTime. ГИС Prognosis реализована в клиент-серверной архитектуре с тонким клиентом, написанном на JavaScript. Её предварительная настройка на регионы, в которых осуществляется систематический прогноз землетрясений, выполняется разработчиками с помощью ГИС GeoTime. Аналитическая часть ГИС Prognosis написана на Java.

Блок-схема ГИС Prognosis изображена на Рис. 1. ГИС Prognosis в автоматическом режиме опрашивает удаленные серверы с каталогами землетрясений и серверы с данными GPS о смещениях поверхности Земли. Каталоги и временные ряды поступают на процессор предварительной обработки данных. Здесь по каталогу землетрясений вычисляются различные пространственно-временные поля признаков, несущие информацию о свойствах сейсмического процесса. Временные ряды требуют более сложной обработки. Развернутое описание обработки рядов GPS приведено в [25]. На выходе процессора сейсмологические и геодинамические данные представляют собой пространственно-временные сеточные поля с шагом по времени Δt . Примерами таких сейсмологических полей являются поле плотности эпицентров землетрясений и поле b -value, примерами геодинамических полей являются поле скорости деформаций поверхности Земли, поле ротора и дивергенции скорости деформаций и т.д. Эти поля и выборка целевых землетрясений поступают на процессор машинного обучения. Здесь алгоритм метода минимальной области тревоги с шагом Δt вычисляет новое поле тревоги и с шагом T вычисляет карту тревоги, по которой осуществляется прогноз. Одновременно все картографические данные поступают на процессор картографики, с помощью которого пользователь может визуализировать временные срезы пространственно-временных полей, графики временных рядов в узлах сетки и эпицентры землетрясений. По запросу пользователя ГИС Prognosis подготавливает актуальную версию ГИС-проекта по анализируемому региону и загружает его в ГИС GeoTime на компьютер пользователя. В ГИС-проект входят исходные данные, поля признаков и поле тревоги.

ГИС GeoTime 3 имеет клиент-серверную архитектуру с толстым Java-клиентом. ГИС имеет инструменты для отображения и совместного анализа векторной и сеточной географической информации о пространственно-временных процессах, обладает высокой интерактивностью, независимостью от платформы и браузера, возможностью работы с распределенными информационными и вычислительными ресурсами и гибкой настройкой функционала под задачи пользователя.

3.2. ГИС Prognosis

ГИС Prognosis выполняет следующий набор операций.

- *Автоматическая загрузка* исходных данных с удаленных серверов. Входные данные состоят из каталогов землетрясений и временных рядов мониторинга процессов, связанных с подготовкой очага сильного землетрясения. Используются данные следующих сайтов:
 - Сайт Камчатского филиала Геофизической службы РАН <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>.
 - Сайт NEIC USGS <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/feed/>.
 - Сайт ISC <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
 - Сайт GMA <https://www.hinet.bosai.go.jp/>.

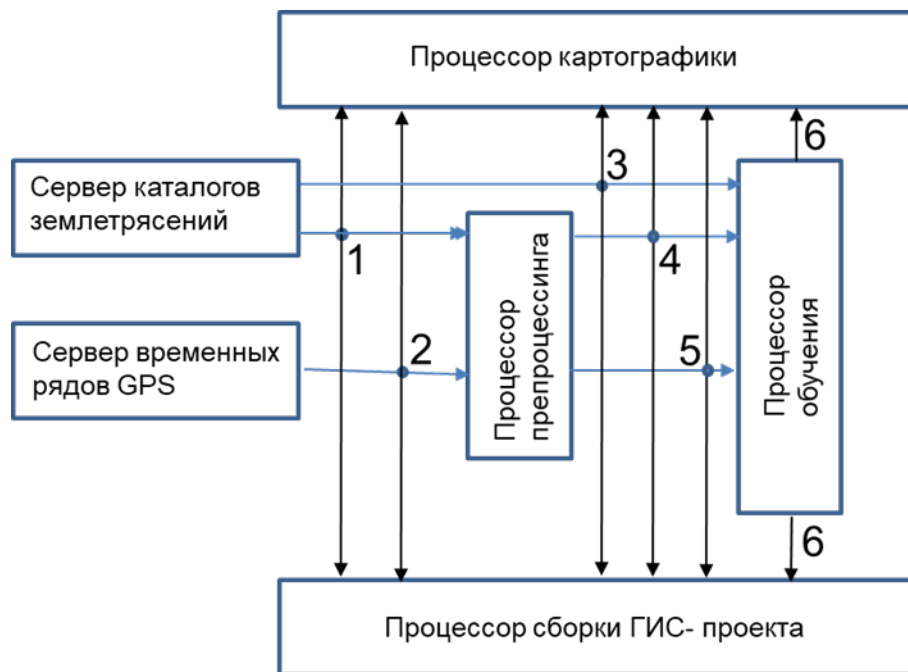


Рис. 1. Блок схема процесса анализа данных в ГИС Prognosis: 1. Каталог землетрясений. 2. Временные ряды GPS. 3. Каталог целевых землетрясений. 4. Пространственно-временные сеточные сейсмологические поля. 5. Пространственно-временные сеточные геодинамические поля. 6. Пространственно-временное сеточное поле тревоги.

- Сайт NGL <http://geodesy.unr.edu/about.php>.

Данные каталогов землетрясений обновляются ежедневно, данные GPS загружаются с шагом Δt .

- *Преобработка* входных данных. Каталоги землетрясений ограничиваются по глубине эпицентров и по минимальной представительной магнитуде землетрясений. Из каталогов выделяются эпицентры целевых событий. Временные ряды данных приемных станций мониторинга GPS очищаются от шумов и обрабатываются с учетом пропусков данных.
- *Анализ*. По каталогам землетрясений и временным рядам вычисляются сеточные пространственно-временные поля признаков прогноза в координатной сетке с единым шагом во времени.
- *Обучение и прогноз*. Обучение выполняется по всем данным, имеющимся до момента прогноза. В результате обучения вычисляется зона тревоги, в которой на интервале T ожидается появление эпицентров целевых событий.

ГИС Prognosis использует следующие интуитивно понятные методы анализа данных.

- Совместный визуальный анализ карт временных срезов полей с эпицентрами целевых землетрясений, происходящих на интервале прогноза T , и с эпицентрами землетрясений с магнитудами выше заданного порога, произошедшими на интервале T до очередного прогноза.
- Интерактивный анализ графиков временных рядов значений пространственно-временных полей.
- Табличное и графическое представление статистических оценок качества прогноза.
- Подготовка ГИС-проекта для выполнения анализа на ГИС GeoTime.

3.3. ГИС GeoTime

Картография

- Анимационное представление 2D срезов 3D и 4D сеточных и векторных полей.
- Совмещенное анимационное представление пространственно-временных сеточных и точечных полей.
- Интерактивное картографическое измерение значений сеточных полей и атрибутов векторных объектов.
- Интерактивное графическое представление разрезов и временных рядов сеточных пространственно-временных полей.
- Представление статистик интерактивно выбираемых полигонов сеточных полей.
- Управление палитрой и размерами картографического представления данных.

Преппроцессинг

- Точечные данные
 - Каталоги землетрясений: оценивание минимальной представительной магнитуды и параметров сейсмического режима, вычисление подкаталогов землетрясений с помощью сортировки по магнитуде, глубине, времени и координатам.
 - Временные ряды: коррекция пропусков данных, сглаживание, оценивание параметров.
- Сеточные поля:
 - Вычисление пространственных и пространственно-временных сеточных полей по точечным маркированным полям: поля, полученные с помощью пространственной интерполяции, поля плотности эпицентров землетрясений, поля наклона графика повторяемости землетрясений (b-value) [27], поля параметра RTL [28].
 - Вычисление пространственных и пространственно-временных сеточных полей по полям линий и полигонов.
 - Фильтрация сеточных полей: усреднение, медианное сглаживание, вычисление производных, модуля и азимута пространственного градиента, анизотропное сглаживание методом AWS.
 - Оценивание изменений значений полей во времени и пространстве.
 - Оценивание инвариантов 2D векторных полей: дивергенция, ротор, сдвиг.
 - Оценивание полей квантилей значений пространственно-временных полей.
 - Сеточные вычисления: вычисления по произвольным алгебраическим и логическим формулам.
 - Оценивание поля коэффициентов корреляции полей в скользящем пространственно-временном окне.
 - Оценивание пространственного поля сходства между временными рядами пространственно-временного поля и временным рядом этого же поля в произвольной точке.

Машинное обучение

- Обучение и моделирование прогноза землетрясений методом минимальной области тревоги.
 - Пространственно-временной прогноз.
 - Прогноз интервалов тревоги и обнаружение на них зон тревоги.
- Обучение и моделирование построения карт аномальных геологических объектов.

С помощью инструментов ГИС GeoТайм пользователь может выполнить ряд исследований по прогнозу землетрясений.

1. Исследование эффективности предвестников землетрясений.
2. Исследование возможности увеличения объема выборки событий для обучения:
 - За счет добавления землетрясений с меньшими магнитудами, чем у целевых событий
 - За счет объединения нескольких однотипных по сейсмотектонике и геодинамике регионов.

3. Исследование возможности прогноза магнитуд землетрясений.
4. Исследование прогноза времени землетрясений в заданном регионе.
5. Исследование пространственно-временных паттернов предвестников землетрясений.
6. Исследование возможности использования универсальных пространственно-временных полей признаков для прогноза землетрясений в однотипных по сейсмотектонике и геодинамике регионах.
7. Экспериментальное исследование физических моделей подготовки землетрясений.

4. ПРИМЕРЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ПЛАТФОРМЫ

4.1. ГИС Prognosis

На Рис. 2 показана стартовая страница платформы. Она предназначена для выбора региона анализа и для загрузки ГИС ГеоТайм на компьютер пользователя. Можно видеть, что платформа настроена на систематический прогноз землетрясений в регионах: Калифорния, Восточное Средиземноморье, Япония и Камчатка. Прогноз вычисляется по каталогам землетрясений и суточным рядам смещений поверхности Земли по наблюдениям GPS.



Рис. 2. Стартовая страница платформы.

В качестве примера рассмотрим регион Калифорнии. Прогноз землетрясений в регионе осуществляется по каталогу землетрясений с сайта NEIC, <http://earthquake.usgs.gov>, и временным рядам суточных горизонтальных смещений поверхности Земли по данным GPS с сайта Геодезической лаборатории Невады, <http://geodesy.unr.edu/about.php>. Свойства сейсмического процесса представлены пространственно-временными полями в координатной сетке $0.1^\circ \times 0.08^\circ \times 30$ суток. Прогноз дается для землетрясений с магнитудами $m \geq 5.5$.

Зона анализа региона представляет собой пересечение двух зон, Первая зона состоит из объединения кругов радиуса 100 км с центрами в узлах координатной сетки, в которые попало не менее 300 эпицентров землетрясений с 1971 по 1993 год с магнитудами от 2.4 и глубинами гипоцентров до 160.0 км. Вторая зона, состоит из объединения кругов 50 км с координатами в центрах наземных станций, принимающих сигналы GPS. Машинное обучение начато от 07.08.2009. Оно выполняется автоматически с шагом $\Delta t = 30$ суток по всем данным, известным к моменту каждого прогноза.

Для прогноза были выбраны 2 сеточных пространственно-временных поля: (1) поле изменения средних скоростей дивергенции деформации поверхности Земли во времени и (2) поле изменения средних скоростей сдвиговой деформации поверхности Земли во времени.

Рис. 3 иллюстрирует анализ прогноза эпицентра землетрясения 24.06.2020 с магнитудой 5.8. Слева на рисунке показан фрагмент карты зоны тревоги на интервале прогноза 10.06.2020–10.07.2020, эпицентр анализируемого землетрясения (центр красного круга) и график временного ряда значений поля тревоги в его эпицентре. Можно видеть, что на интервале прогноза значение поля тревоги в эпицентре намного меньше порога зоны тревоги 20% и равно примерно 4%. Это означает, что вероятность ложной тревоги при обнаружении этого землетрясения очень мала и примерно составляет 4%. Справа показана карта временного среза поля увеличения значений дивергенции средней скорости деформаций на годовом временном интервале 16.06.2019–10.06.2020 по сравнению со средней скоростью деформаций за предыдущий год. В [29] показано, что это поле является одним из наиболее информативных признаков прогноза. Можно видеть, что анализируемому землетрясению предшествовала значительная аномалия увеличения значений дивергенции средней скорости деформаций.

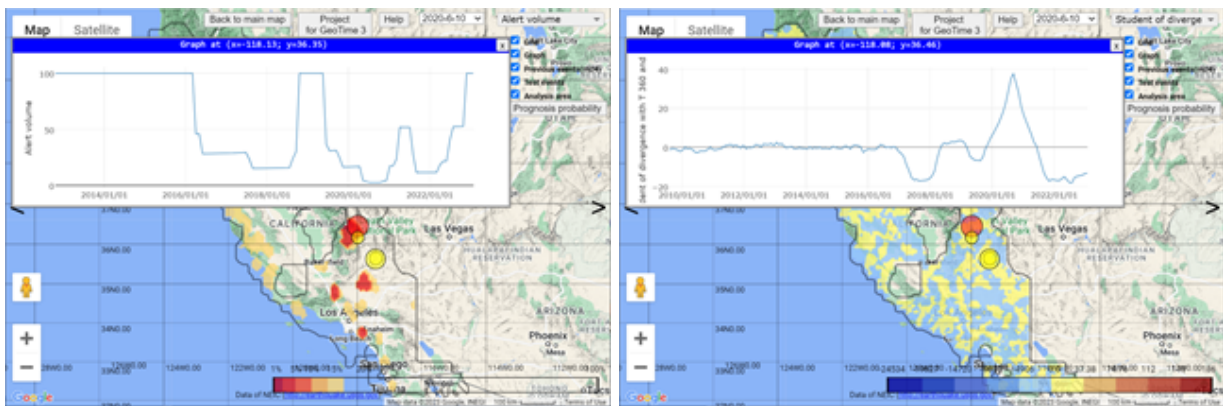


Рис. 3. Анализ прогноза землетрясения 24.06.2020 с магнитудой 5.8. Слева: зона тревоги на интервале прогноза 10.06.2020–10.07.2020, эпицентр землетрясения (центр красного круга) и график временного ряда значений поля тревоги в его эпицентре. Справа: карта временного среза поля увеличения значений дивергенции средней скорости деформаций за 360 суток на интервале 16.06.2019–10.06.2020 по сравнению со средней скоростью деформаций за предыдущие 360 суток.

Параметры и статистические данные прогноза представлены в файле, который автоматически формируется с использованием шаблонов и лингвистических переменных. Ниже на Рис. 4 приведена часть такого описания для региона Калифорнии.

4.2. ГИС GeoTime

Сравнение методов оценивания полей плотности эпицентров землетрясений

Одним из важнейших факторов успешного прогноза землетрясений являются методы вычисления пространственно-временных полей, которые несут информацию о подготовке целевых землетрясений. Многие предвестники сильных землетрясений используют значения плотности эпицентров землетрясений. В первых публикациях пространственные поля плотности эпицентров землетрясений [30, 31] оценивались с помощью локально-ядерного сглаживания с цилиндрическим окном. В более поздних работах для оценивания пространственно-временных полей сейсмических параметров вместо цилиндрического окна использовалась гауссова ядерная функция [28]. В работе [32, 33] предложен и исследован новый метод адаптивного весового сглаживания пространственных и пространственно-временных полей AWS

- Машинное обучение от 2009-08-07 21:20:30.
- Прогноз от 2012-10-20 21:20:30.
- Поле прогноза является функцией следующих двух полей признаков:
 - Положительные значения изменений средних значений дивергенции деформаций, равные отношению разности средних значений на двух последовательных интервалах к оценке стандартного отклонения этой разности. Длина интервалов по 360 дней.
 - Положительные значения изменений средних значений сдвиговых деформаций, равные отношению разности средних значений на двух последовательных интервалах к оценке стандартного отклонения этой разности. Длина интервалов по 360 дней.

Параметры цилиндра прогноза: радиус 18.0 км, образующая 60 суток. В зоне анализа наблюдалось 15 эпицентров целевых землетрясений.

Объем тревоги (прогнозируемый)	Объем тревоги (при прогнозе)	Число обнаруженных событий	Вероятность обнаружения (доля обнаруженных событий)
1.0%	0.17%	0	0.00%
5.0%	3.58%	7	46.67%
10.0%	3.62%	7	46.67%
15.0%	6.77%	8	53.33%
20.0%	17.59%	11	73.33%

График зависимости оценки вероятности обнаружения землетрясений с целевыми магнитудами, большими или равными 5.5 (Forecast), от средней величины отношения площади зоны тревоги к площади зоны анализа (Alert volume).

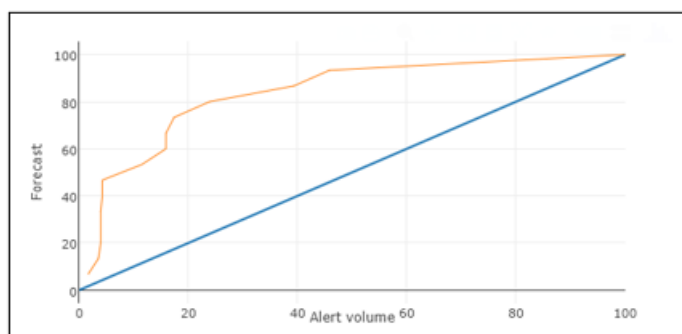


Рис. 4. Фрагмент описания результатов прогноза в ГИС Prognosis.

(Adaptive Weight Smoothing), впоследствии обобщенный авторами и названный PS-подходом (Propagation-Separation). Этот метод ориентирован на сглаживание полей, которые включают в себя области с локально постоянными значениями. Отличие от стандартных методов состоит в том, что границы между локальными областями с различными постоянными значениями сохраняются, а качество сглаживания участков поля с постоянными значениями соответствует стандартным локально-ядерным методам. AWS обобщает методы локально-ядерного сглаживания, учитывая не только локальные особенности пространственно-временных данных, но и их статистическую структуру. Для учета локальных статистических свойств данных в методе вводится статистическая мера контраста, основанная на оценке максимума локально взвешенного правдоподобия. В работе [33] показано, что для достаточно широкого класса вероятностных моделей, принадлежащих семейству распределений экспоненциального типа, мерой контраста является расстояние (расхождение) Кульбака-Лейблера [34]. В [35, 36] метод обобщен для оценивания полей параметров сейсмического процесса по маркированным точечным полям, которыми являются, в частности каталоги землетрясений.

Рассмотрим анализ эффективности прогноза землетрясений по полям плотности эпицентров землетрясений на примере данных региона Камчатки. Для анализа мы используем каталог землетрясений, полученный с сайта Камчатского филиала Геофизической службы РАН <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>. Анализируемые поля вычисляются по эпицентрам землетрясений с 1986 г. с магнитудами $m \geq 3.5$ и глубинами гипоцентров $H \leq 160$ км. Прогнозируются эпицентры землетрясений с магнитудами $m \geq 6.0$ и глубинами гипоцентров $H \leq 60$ км. Обучение начинается с 30.03.1998 и заканчивается перед моментом тестирования. Интервал тестирования составляет от 29.05.2010 до 27.09.2022. Алгоритм прогноза имеет следующие параметры: прогноз дается каждые 30 суток, радиус цилиндра тревоги $R = 8$ км, образующая цилиндра тревоги $T = 30$ суток. Зона анализа и эпицентры тестируемых землетрясений показаны на Рис. 5.

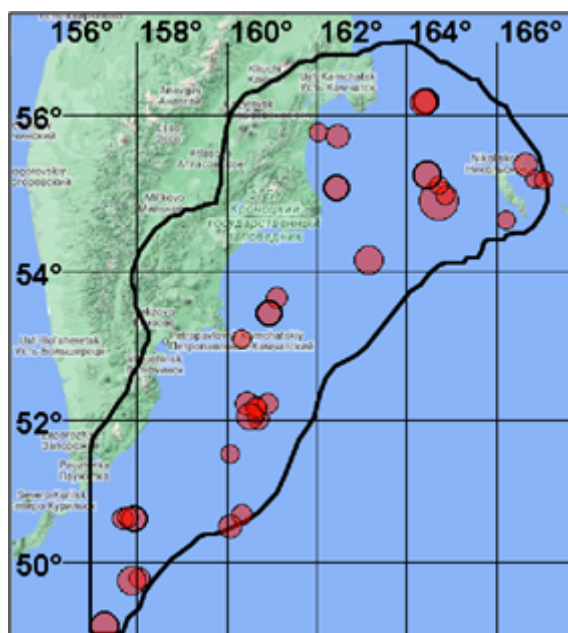


Рис. 5. Зона анализа и эпицентры тестовых землетрясений на интервале 29.05.2010–27.09.2022 с магнитудами $m \geq 6.0$ и глубинами эпицентров $H \leq 60$ км.

Анализ проводится для 3 полей:

S_1 — поле плотности эпицентров землетрясений, вычисленное по каталогу землетрясений с помощью метода гауссовского ядерного сглаживания. Значения поля плотности эпицентров вычислялись с экспоненциальной ядерной функцией:

$$d(x, y, t) = \sum_n \left(e^{-\frac{r_n^2}{R_0^2}} * e^{-\frac{t_n}{T_0}} \right) * 1\left(\varepsilon - \frac{r_n}{R_0}\right) * 1\left(\varepsilon - \frac{t_n}{T_0}\right) \quad (4)$$

где: $1(u) = \begin{cases} 1, & u \geq 0 \\ 0, & u < 0 \end{cases}$, (x, y, t) — координаты узла 3D сетки, n — номер события, m_n — магнитуда n -го землетрясения, r_n [км] — расстояние от узла сетки до эпицентра, t_n [сутки] — временной интервал от узла сетки до эпицентра, $(t - \varepsilon T) \leq t_n \leq t$, радиус $R_0 = 50$ км и временной интервал $T_0 = 100$ суток - коэффициенты затухания, $\varepsilon = 2$ — пороговый коэффициент.

S_2 — поле плотности эпицентров, вычисленное с помощью обобщенного метода AWS [35,36] по каталогу землетрясений.

S_3 — поле плотности эпицентров, вычисленное с помощью метода применения AWS [32,33], по полю S_1 .

В таблице 1 показаны координаты эпицентров тестовых землетрясений и результаты прогноза по полям S_1 , S_2 и S_3 . В последних трех столбцах таблицы показаны значения объема тревоги в эпицентрах тестовых землетрясений. Значения объёмов тревоги не более 0.2 выделены жирным шрифтом. Эти землетрясения успешно обнаружены с объёмом тревоги не более $V = 0.2$.

Таблица 2 содержит оценки качества обнаружения целевых событий по каждому из анализируемых полей. На Рис. 6 показаны зависимости оценки вероятности обнаружения целевых событий U от объёма тревоги V . Можно видеть, что наиболее эффективными для прогноза землетрясений в регионе Камчатки являются поля S_2 и S_3 , для которых при оценивании плотности эпицентров землетрясений применялось адаптивное весовое сглаживание (AWS).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рассмотрели технологию мониторинга сейсмогенных процессов и систематического прогноза землетрясений. Технология объединяет геоинформационные инструменты картографического и интеллектуального анализа данных. Примером реализации технологии является демонстрационная сетевая платформа Prognosis (<https://gis.iitp.ru/prognosis-gps/>). Платформа состоит из двух сетевых ГИС. ГИС Prognosis в автоматическом режиме систематически вычисляет карты прогноза землетрясений для нескольких тестовых регионов. В этой ГИС пользователю доступны интуитивно понятные средства картографического анализа карт тревоги и пространственно-временных полей, на основании которых карты тревоги вычисляются при обучении. ГИС GeoTime является многофункциональной системой, ориентированной на исследования в области прогноза землетрясений. Эта система запускается с тем региональным ГИС-проектом, который выбран пользователем ГИС Prognosis. ГИС GeoTime предоставляет пользователю инструменты, обеспечивающие картографический анализ пространственно-временных процессов, ряд методов вычисления сеточных полей по сеточным и векторным данным, а также методы машинного обучения прогнозу землетрясений и оценки сейсмической опасности. В разделе ГИС Prognosis мы показали примеры картографического анализа, применяемые при систематическом прогнозе землетрясений. Можно видеть, что методы анализа вполне наглядны и доступны широкому классу пользователей. Раздел ГИС GeoTime содержит пример анализа данных, применяемых при прогнозе землетрясений. Пример показывает эффективность прогноза землетрясений Камчатки по полям плотности эпицентров

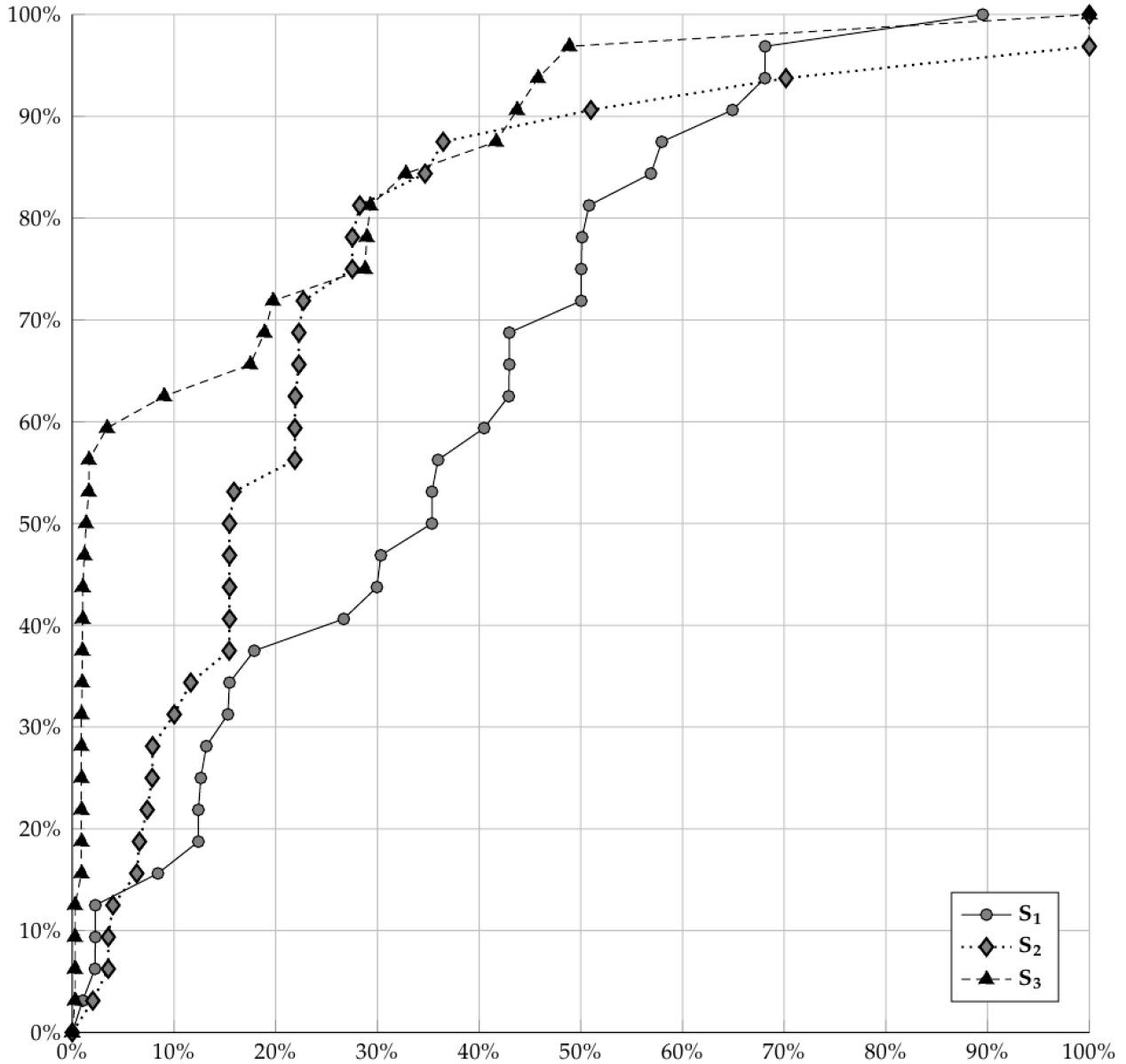


Рис. 6. Графики зависимостей $U(V)$ при прогнозе по полям плотности эпицентров землетрясений S_1 , S_2 и S_3 .

Таблица 1. Результаты прогноза целевых землетрясений по пространственно-временным полям плотности эпицентров землетрясений S_1 , S_2 и S_3 .

№	Дата	Долгота	Широта	Глубина Н [км]	Магнитуда m	Объём тревоги при прогнозе		
						Поле S_1	Поле S_2	Поле S_3
1	2010/06/04	160.45	52.22	38.0	6.3	0.300	0.159	0.197
2	2011/01/10	162.47	55.73	49.0	6.3	0.303	0.154	0.293
3	2012/08/20	160.08	51.53	44.0	6.0	0.508	1.0	0.290
4	2013/01/05	157.94	50.63	52.0	6.4	0.124	0.040	0.120
5	2013/01/08	157.66	50.63	51.0	6.1	0.124	0.035	0.010
6	2013/01/13	157.80	50.65	49.0	6.1	0.022	0.035	0.010
7	2013/01/27	160.33	50.68	58.0	6.2	0.895	1.0	0.090
8	2013/02/23	158.04	49.77	45.0	6.2	0.023	0.365	0.010
9	2013/02/24	157.88	49.74	39.0	6.7	0.023	0.223	0.010
10	2013/03/25	160.69	52.01	50.0	6.1	0.354	0.223	0.009
11	2013/03/25	160.65	52.08	42.0	6.0	0.430	0.155	0.009
12	2013/03/25	160.67	52.18	40.0	6.0	0.500	0.155	0.009
13	2013/03/26	160.89	52.22	59.0	6.1	0.500	0.155	0.009
14	2013/03/26	160.63	52.18	43.0	6.2	0.430	0.079	0.009
15	2013/03/26	160.49	52.05	48.0	6.5	0.354	0.155	0.009
16	2014/05/08	166.86	55.19	43.0	6.0	0.681	0.347	1.0
17	2016/02/08	163.14	54.14	42.0	6.7	0.501	0.283	0.489
18	2016/03/23	161.11	53.66	48.0	6.2	0.429	0.100	0.417
19	2017/08/19	160.33	53.10	51.0	6.0	0.153	0.079	0.328
20	2017/12/14	166.65	55.37	46.0	6.3	0.155	0.020	0.014
21	2018/04/11	162.44	55.08	56.0	6.4	0.267	0.063	0.189
22	2018/08/30	157.26	49.09	41.0	6.6	0.084	0.117	0.034
23	2018/11/09	164.71	54.91	54.0	7.3	0.681	0.275	0.003
24	2018/11/09	164.85	54.99	54.0	6.0	0.649	0.275	0.003
25	2018/11/11	164.71	55.12	55.0	6.0	0.569	0.219	0.003
26	2018/11/03	164.46	55.25	51.0	6.6	0.405	0.219	0.003
27	2019/02/15	160.07	50.51	49.0	6.3	0.126	0.702	0.288
28	2019/05/14	164.41	56.18	57.0	6.4	0.179	0.227	0.016
29	2019/05/15	164.36	56.16	53.0	6.5	0.010	0.219	0.016
30	2019/06/29	162.04	55.78	60.0	6.0	0.132	0.074	0.175
31	2020/01/10	160.92	53.44	52.0	6.4	0.356	0.066	0.437
32	2020/02/22	166.21	54.67	37.0	6.0	0.580	0.510	0.458

Таблица 2. Оценки качества прогноза целевых землетрясений по полям плотности эпицентров землетрясений S_1 , S_2 и S_3 .

Объём тревоги	Поле S_1		Поле S_2		Поле S_3	
	Q^*	$U = Q^*/Q$	Q^*	$U = Q^*/Q$	Q^*	$U = Q^*/Q$
0.05	4	0.125	4	0.125	19	0.594
0.10	5	0.156	9	0.281	20	0.625
0.15	9	0.281	11	0.344	20	0.625
0.20	12	0.375	17	0.531	23	0.719
0.25	12	0.375	23	0.719	23	0.719
0.30	14	0.438	26	0.813	26	0.813

землетрясений, вычисленным с помощью применения метода адаптивного весового сглаживания (AWS).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hyndman D., Hyndman D. Natural hazards and disasters. — Cengage Learning, 2016.

2. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. — 1993.
3. Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и предвестники. — Общество с ограниченной ответственностью Международная академическая издательская компания "Наука/Интерпериодика 2003.
4. Geller R. J. et al. Earthquakes cannot be predicted //Science. — 1997. — Т. 275. — №. 5306. — С. 1616–1616.
5. Короновский Н. В., Наймарк А. А. Непредсказуемость землетрясений как фундаментальное следствие нелинейности геодинамических систем //Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2012. — №. 6. — С. 3–12.
6. Гуфельд И. Л., Матвеева М. И., Новоселов О. Н. Почему мы не можем осуществить прогноз сильных коровых землетрясений //Геодинамика и тектонофизика. — 2011. — Т. 2. — №. 4. — С. 378–415.
7. Keilis-Borok V., Soloviev A. A. (ed.). Nonlinear dynamics of the lithosphere and earthquake prediction. — Springer Science and Business Media, 2002.
8. Kossobokov, V.; Shebalin, P. Earthquake prediction. In Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2003; pp. 141–207.
9. Corbi F. et al. Machine learning can predict the timing and size of analog earthquakes //Geophysical Research Letters. — 2019. — Т. 46. — №. 3. — С. 1303–1311.
10. Shebalin P. N. et al. Combining earthquake forecasts using differential probability gains //Earth, Planets and Space. — 2014. — Т. 66. — №. 1. — С. 1–14.
11. Amei A., Fu W., Ho C. H. Time series analysis for predicting the occurrences of large scale earthquakes //International Journal of Applied Science and Technology. — 2012. — Т. 2. — №. 7.
12. Marzocchi W., Zechar J. D. Earthquake forecasting and earthquake prediction: different approaches for obtaining the best model //Seismological Research Letters. — 2011. — Т. 82. — №. 3. — С. 442–448.
13. Moustira M., Avraamides M., Christodoulou C. Artificial neural networks for earthquake prediction using time series magnitude data or seismic electric signals //Expert systems with applications. — 2011. — Т. 38. — №. 12. — С. 15032–15039.
14. Rhoades D. A. Mixture models for improved earthquake forecasting with short-to-medium time horizons //Bulletin of the Seismological Society of America. — 2013. — Т. 103. — №. 4. — С. 2203–2215.
15. Kail R., Burnaev E., Zaytsev A. Recurrent convolutional neural networks help to predict location of earthquakes //IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. — 2021. — Т. 19. — С. 1–5.
16. Priambodo B., Mahmudy W. F., Rahman M. A. Earthquake magnitude and grid-based location prediction using backpropagation neural network //Knowledge Engineering and Data Science. — 2020. — Т. 3. — №. 1. — С. 28–39.
17. Mignan A., Broccardo M. Neural network applications in earthquake prediction (1994–2019): Meta-analytic and statistical insights on their limitations //Seismological Research Letters. — 2020. — Т. 91. — №. 4. — С. 2330–2342.
18. Asim K. M. et al. Earthquake prediction model using support vector regressor and hybrid neural networks //PloS one. — 2018. — Т. 13. — №. 7. — С.
19. Panakkat A., Adeli H. Neural network models for earthquake magnitude prediction using multiple seismicity indicators //International journal of neural systems. — 2007. — Т. 17. — №. 01. — С. 13–33.
20. Gitis V. G., Derendyaev A. B. Web-Based GIS platform for automatic prediction of earthquakes //Computational Science and Its Applications—ICCSA 2018: 18th International Conference, Melbourne, VIC, Australia, July 2–5, 2018, Proceedings, Part III. — Cham : Springer International Publishing, 2018. — С. 268–283.
21. Gitis V., Derendyaev A. From monitoring of seismic fields to the automatic forecasting of earthquakes //International Journal of Web Information Systems. — 2019.

22. Gitis V. G., Derendyaev A. B., Petrov K. N. Approach to Systematic Prediction of Earthquakes //Journal of Communications Technology and Electronics. — 2022. — Т. 67. — №. 6. — С. 764–777.
23. Gitis V. G., Derendyaev A. B. Machine learning methods for seismic hazards forecast //Geosciences. — 2019. — Т. 9. — №. 7. — С. 308.
24. Gitis V., Derendyaev A. The method of the minimum area of alarm for earthquake magnitude prediction //Frontiers in Earth Science. — 2020. — Т. 11. — С. 585317.
25. Gitis V., Derendyaev A., Petrov K. Analyzing the performance of GPS data for earthquake prediction //Remote Sensing. — 2021. — Т. 13. — №. 9. — С. 1842.
26. Gitis V. G., Derendyaev A. B., Petrov K. N. On the Applied Efficiency of Systematic Earthquake Prediction //Computational Science and Its Applications—ICCSA 2022 Workshops: Malaga, Spain, July 4–7, 2022, Proceedings, Part III. — Cham : Springer International Publishing, 2022. — С. 607–624.
27. Gutenberg B. The energy of earthquakes //Quarterly Journal of the Geological Society. — 1956. — Т. 112. — №. 1–4. — С. 1–14.
28. Соболев Г. А., Тюпкин Ю. С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки //Вулканонология и сейсмология. — 1996. — №. 4. — С. 64–74.
29. Гитис В. и др. Исследование предвестников сильных землетрясений, вычисленных по данным космической геодезии1 //Информационные процессы. — 2022. — Т. 22. — №. 3. — С. 220–236.
30. Ризниченко Ю. В. Об изучении сейсмического режима //Изв. АН СССР. Сер. Геофиз. — 1958. — №. 9. — С. 1057–1074.
31. Бунэ В.И., Горшков Г.П., Крестников В.Н. и др. Сейсмическое районирование территории СССР: методические основы и региональное описание карты 1978 г. //М.: Наука — 1980
32. Polzehl J., Spokoiny V. G. Adaptive weights smoothing with applications to image restoration //Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology). — 2000. — Т. 62. — №. 2. — С. 335–354.
33. Polzehl J., Spokoiny V. Propagation–separation approach for local likelihood estimation //Probability Theory and Related Fields. — 2006. — Т. 135. — С. 335–362.
34. Kullback S. Information theory and statistics. — Courier Corporation, 1997.
35. Gitis V. G. et al. Adaptive estimation of seismic parameter fields from earthquake catalogs //Journal of Communications Technology and Electronics. — 2015. — Т. 60. — С. 1459–1465.
36. Gitis V. G. et al. Earthquake prediction using the fields estimated by an adaptive algorithm //Proceedings of the 7th International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics. — 2017. — С. 1–8.

Geoinformation monitoring platform of geophysical fields, earthquake prediction and seismogenic processes studies

V.G. Gitis, A.B. Derendyaev, K.N. Petrov, M.A. Vitushko

The paper describes a platform for monitoring and analyzing seismogenic processes. The platform consists of two separate GIS. The first is the network GIS Prognosis, which downloads and processes data from remote servers, as well as systematic earthquake forecasting and project preparation for further analysis. The second system, GeoTime 3, is a stationary GIS that provides opportunities for detailed research of data prepared in GIS Prognosis. The article provides examples of data analysis results on this platform. The GIS Prognosis demonstrated the potential of systematic observation of the seismological situation on the example of California. The GeoTime GIS compares the effectiveness of methods for estimating the density fields of earthquake epicenters when predicting earthquakes in Kamchatka, and it's shown that the use of adaptive weight smoothing gives the best result among the others.

KEYWORDS: GIS, machine learning, earthquake prediction, time series, spatiotemporal fields, minimum volume area method.