

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 550.343.6

А.В. Овчаренко

Институт геофизики Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АППРОКСИМАЦИОННОЙ
ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ УРАЛА**



Ключевые слова: *деформации, сейсмичность, геодинамический мониторинг, 4D-модель, прогноз развития деформаций и сейсмичности.*

Усовершенствована технология создания динамической прогнозирующей модели деформационного процесса, основанная на аппроксимации элементов деформационного тензора множеством относительно простых единичных время-зависимых функций. В качестве семейства функций выбраны плоские деформационные фронты, каждый из которых описывается 5 параметрами (четыре кинематических и один амплитудный). Распределение деформаций для единичных функций предполагается убывающим как квадрат расстояния от осевой плоскости фронта. Проблема решения обратной нелинейной задачи для выбранного семейства аппроксимирующих функций сводится путем декомпозиции вначале к решению нелинейной обратной задачи нахождения кинематических параметров и общего числа аппроксимирующих функций, а на втором этапе - к нахождению амплитудных параметров модели.

A. V. Ovcharenko

**THE CREATION AND STUDY OF THE APPROXIMATION OF THE
DYNAMIC DEFORMATION MODELS OF THE EARTH'S CRUST OF THE URALS**

Keywords: *deformation, seismicity, geodynamic monitoring, 4D-model, forecast of deformation and seismicity*

The technology of creating a dynamic predictive model of the deformation process based on the approximation of the elements of the deformation tensor by a set of relatively simple time-dependent functions is improved. As a family of functions, flat deformation fronts are chosen, each of which is described by 5 parameters (four kinematic and one amplitude). The strain distribution for the unit functions is assumed to be decreasing as the square of the distance from the axial plane of the front. The problem of solving the inverse nonlinear problem for the selected family of approximating functions is reduced, by decomposition, to the solution of the first nonlinear inverse problem of finding the kinematic parameters and the total number of approximating functions, and at the second stage to find the amplitude parameters of the model.

Овчаренко Аркадий Васильевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института геофизики Уральского отделения РАН (Екатеринбург). Тел.+79226023091; e-mail: ark-ovcharenko@yandex.ru.

Arkadiy Vasilievich Ovcharenko – PhD, senior scientific researcher at the Institute of Geophysics of the Ural branch of the RAS (Yekaterinburg). Phone: +79226023091; e-mail: ark-ovcharenko@yandex.ru.

Введение

Построение модели в пространстве четырех измерений (x, y, z, t) понимается как 4D-моделирование (от англ. 4-dimensional modelling). Идея создания такой модели деформационного процесса была предложена ранее (Овчаренко, 1998) и планомерно развивалась на протяжении двадцати лет. Были созданы не только базовые алгоритмы и программные средства, но и конкретные модели по различным регионам с высокой сейсмичностью и геодинамической изученностью (о. Тайвань, Юго-Восточная Европа, Северный Тянь-Шань). В настоящей работе описывается 4D-модель по Уральскому региону. Созданию такой модели предшествовал этап длительного исторического накопления многими организациями и коллективами разнообразной геотектонической информации: сейсмических каталогов, многократных высокоточных нивелировок дневной поверхности, результатов геодезического мониторинга триангуляционных пунктов, высокоточных GPS-наблюдений, наблюдений наклонов земной поверхности, результатов мониторинга уровня воды и радиоактивных газов в скважинах, уровня моря по сети станций, горного давления в шахтах, гравитационного поля наземного и спутникового. Поиск, накопление, сбор, обработка и стандартизация этой информации заняли многие годы. К сожалению, многие из перечисленных данных в настоящее время представляют лишь исторический интерес, поскольку либо точность их недостаточна, либо временные ряды оказываются недостаточной длительности.

Как известно, Урал относится к регионам с умеренной сейсмичностью, что отражено как на картах общего сейсмического районирования России, так и в монографиях по региональной сейсмичности (Кашубин и др., 2001; Землетрясения..., 2007). Однако, сейсмические события сентября-октября 2018 г. в районе г. Катав-Ивановска (5.09.2018, M5.9) заставляют пересмотреть этот вывод (сейсмологические бюллетени KNDC - <http://kndc.kz/kndc/>, а также геофизической службы РАН - <http://eqru.gsras.ru/events/>).

К настоящему времени предложено несколько схем краткосрочного прогнозирования землетрясений (Соболев, 1993; Dobrovolsky, 1993; Кособоков, 2005, и др.). Эти схемы оперируют конкретным набором так называемых предвестников, представляющих особенности хода различных данных прямого и косвенного мониторинга. Известная оторванность системы предвестников от физической картины деформирования земной коры указывает на эмпиризм в создании системы прогнозирования. Вместе с этим, делаются попытки построить физические обоснованные модели деформирования и разрушения земной коры (Николаевский, Рамазанов, 1985; Николаевский, 1995, 2001; Овчаренко, 1998). Можно сказать, что проблема краткосрочного прогнозирования еще далека от своего разрешения.

В Уральском регионе расположены крупные промышленные металлургические и химические объекты, мосты, плотины, подземные рудники, а также иные опасные производства, в том числе, радиационные. В итоге длительной работы радиационных предприятий возникла система прудов-накопителей ядерных отходов. Они содержат большие объемы токсичных радиоактивных отходов и являются потенциально опасными для заражения течений и пойм рек Теча-Исеть-Тобол-Иртыш-Обь, далее - Обской губы и прилегающей морской акватории Карского моря. Опасной является также миграция этих токсичных отходов с подземными водами за пределы промышленной зоны в области соседних незараженных водоемов и подземных водозаборов. Каскад водоемов-отстойников комбината «Маяк» сдерживается насыпными грунтовыми дамбами, которые в последние годы армированы бетонным покрытием. Как показывает мировая практика, все-

гда существует некоторая вероятность разрушения таких дамб в результате разнообразных природных процессов, в том числе геодинамических, а также сейсмических событий в непосредственной близости от объекта. Именно поэтому постоянная, разнообразная и всесторонняя оценка деформационного и сейсмического процесса в Уральском регионе является чрезвычайно актуальной.

Информационная основа моделирования деформационного процесса

Основой моделирования деформационного процесса являются данные геодинамического мониторинга, которые можно разделить на прямые и косвенные. К *прямым* видам деформационного мониторинга следует относить те, при которых инструментально измеряются какие-либо характеристики деформационного тензора. Так, методы GPS-мониторинга позволяют измерять смещения или скорости смещений на длинных базах. Лазерные и светодальномерные деформометры также измеряют смещения, но на более коротких базах, многократные нивелировки поверхности дают измерения вертикальных смещений и скорости смещений, гравиметрический мониторинг со специальной обработкой дает вертикальные ряды смещений пункта мониторинга. Иные виды мониторинга, такие как уровень моря и замкнутых водоемов, уровень воды и температура в скважинах, вариации концентрации газов в скважинах и шпурах, вариации электрического и электромагнитного полей на определенных базах, а также многие другие геофизические, относятся к *косвенным видам мониторинга*. Стандартный метод сейсмического мониторинга с созданием сейсмического каталога также относится к косвенным методам.

Сбор и анализ разрозненных методов мониторинга, приведение их в стандартные форматы моделирования является рутинной и одновременно объемной задачей. Так, например, сейсмические каталоги, ГС РАН, KNDC, Norsar и исторические каталоги имеют различные форматы хранения даты и времени сейсмических событий, содержат дополнительную и часто излишнюю при моделировании информацию о географии регионов, сейсмической балльности и магнитудах разных типов. В предварительной обработке и стандартизации нуждаются данные по всем видам мониторинга.

Целью этапа предварительной обработки является создание двух основных файлов моделирования – файла геодинамических индикаторов и файла амплитудной калибровки. Файл геодинамических индикаторов представляет собой таблицу с координатами и временем особой точки (x, y, z, t), а также типом мониторинга. Файл амплитудной калибровки содержит кроме этого инструментально измеренную амплитуду, а также время старта мониторинга. С течением времени и увеличением информации эти файлы постепенно наращиваются. Особые точки мониторинга определяются по временным рядам отдельных его видов. Так, изменение уровня воды в скважинах фиксирует переход от сжатия (максимальный уровень) к растяжению (минимальный уровень). В случае мониторинга радона, наоборот, сжатие связано с уменьшением концентрации радона, а растяжение - с резким увеличением, и на эту картину накладывается процесс естественного радиоактивного экспоненциального распада. Во всех случаях в таблицу индикаторов в результате обработки помещаются пространственно-временные точки, фиксирующие во времени момент прохождения деформационного фронта через станцию мониторинга.

Большое значение в информационной основе имеют различные вспомогательные карты и картографические слои, а также вспомогательные программные средства. Эти карты и слои используются при анализе геодинамической опасности для отдельных районов и объектов. Границы административных районов, речная система, крупные водоемы и водохранилища, плотины, контуры городов и поселков представляют примеры вспомогательной информации. Широко применяются при моделировании цифровые модели рельефа местности.

Методика двухэтапного 4D-моделирования деформационного процесса

Алгоритм поиска кинематических параметров семейства деформационных фронтов описан в работах А.В. Овчаренко (1998) и Е. Нусипова, А.В. Овчаренко (2007). Усовершенствования алгоритма в настоящей работе сводились к увеличению скорости исчерпания таблицы индикаторов в процессе итерационного поиска кинематических параметров деформационных фронтов. Усовершенствования алгоритма нахождения амплитудных параметров модели включали два важных момента. Первый - расширение информационной базы за счет прямого гравиметрического метода мониторинга деформационного процесса. Вариации гравиметрического поля амплитудой в сотые доли миллигалла возникают, главным образом, в результате изменения высоты пункта над уровнем моря. Существует известная линейная связь изменения высоты H и локальных гравиметрических вариаций Gz

$$H = 3,24044 * Gz \quad (1)$$

Таким образом, обработка данных гравиметрического мониторинга сводится к фильтрации локальных аномалий, например, путем исключения приливных вариаций и сползания нуля гравиметра, далее исключения простого тренда в форме полинома малых степеней. Гравиметрические ряды мониторинга в настоящее время представляют наиболее надежную базу для амплитудной калибровки модели. На **рис. 1** приводится пример обработки данных гравиметрического временного ряда для последующего использования при калибровке деформационной модели.

В настоящей работе при калибровке 4D-модели были использованы гравиметрические данные за 2013-2018 гг. по пунктам IGF (Екатеринбург) и ARTI (геофизическая обсерватория «Арти»). Кроме того, использованы данные многократных нивелировок (1925-1988 гг.) дневной поверхности, данные GPS-мониторинга, как глобальной сети (1999-2018 гг.), так и локальных реперов Уральского региона. Новейшими данными, которые можно использовать для определения кинематических и амплитудных параметров модели, являются спутниковые гравиметрические измерения (GRACE, 2017). Визуальный анализ карт Grace не оставляет сомнения в существовании системы глобальных деформационных фронтов (**рис. 2**).

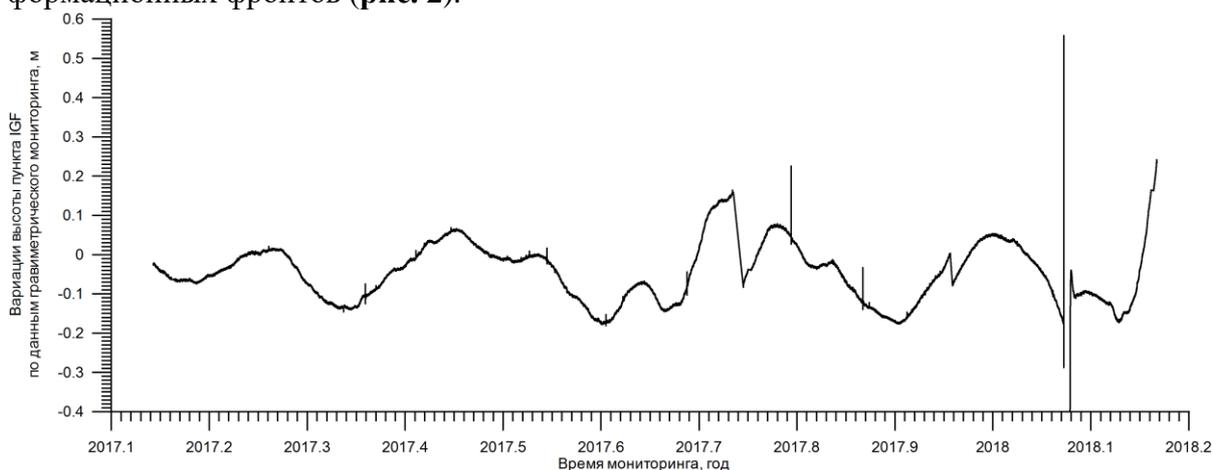


Рис. 1. Вариации высоты пункта IGF по данным гравиметрического мониторинга. На протяжении года высота пункта волнообразно меняется на 10-20 см. Отдельные резкие скачки имеют сейсмическую или инструментальную природу и устраняются на этапе предварительной обработки. Период деформационных колебаний высоты составляет 1-3 месяца.

В настоящее время завершен крупный международный проект по мониторингу гравитационного поля с помощью пары спутников GRACE. Данные GRACE убед-

тельно показывают вариации гравитационного поля Земли, связанные с таянием ледников, перемещением водных масс, а также миграцией протяженных линейных фронтов (рис. 2) неустановленной природы. Мониторинги гравитационного поля на Земле и с помощью спутников GRACE удачно дополняют друг друга, показывают идентичность вариаций обоих методов, но, разумеется, более высокую точность и детальность наземных наблюдений.

AIUB RL02 monthly DDK5 - 2013/12/01 - 2013/12/31
Equivalent Water Heights comparison to time series mean (degree 2 to 90)
min -220.31 cm / max 53.53 cm / weighted rms 11.01 cm / oceans 7.21 cm

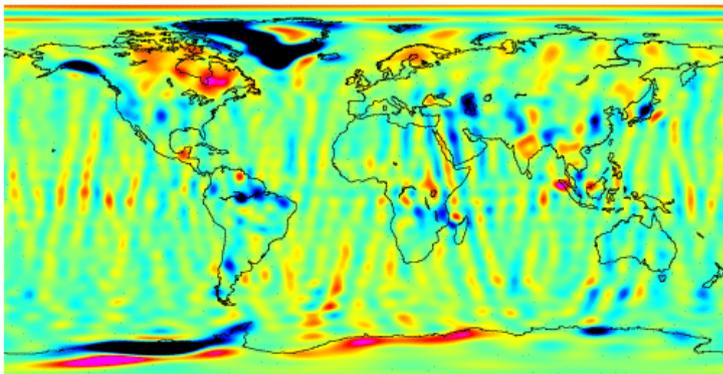


Рис. 2. Пример обработки спутниковых гравиметрических измерений GRACE (2013/12, по данным Thegraceplotter.com).

Аномалии эквивалентной высоты относительно средней высоты океана образуют динамическую систему протяженных субширотных и субмеридианальных фронтов, которые подтверждаются соответствующими наземными вариациями (рис.1).

Данные наземного мониторинга гравитационного поля и спутни-

кового GRACE в настоящее время представляют надежную основу для амплитудной калибровки модели деформационного процесса.

Основные результаты и анализ модели

Применение двухэтапной методики моделирования позволило найти кинематическую систему деформационных фронтов и амплитуды их внутренних деформационных смещений. Такая модель является время-зависимой и может быть рассчитана для любого момента прошлого и будущего на интервалах в десятки и сотни лет. Для анализа и визуализации модели созданы необходимые программные средства, которые совместно с универсальными графическими пакетами образуют интегрированную среду моделирования. На рис. 3 приводится зависимость амплитуды от скорости миграции найденных фронтов. Видим, что модуль амплитуды деформационных фронтов находится в обратной зависимости от скорости их миграции. На основе такой зависимости можно разделить общую модель на три условные части – быструю, среднюю и медленную.

Самые быстрые деформационные фронты модели имеют малую амплитуду внутренних смещений порядка 10 мм, т.е. частицы смещены внутри фронта на 10 мм на базе в 100 км, и, таким образом, максимальные деформации для этих фронтов имеют значение порядка 10^{-6} . Медленные фронты со скоростью 0-0,5 км/год имеют внутренние деформации порядка 10^{-4} . Отсюда следует, что именно медленные деформации вызывают критические напряжения, а затем разрушение земной коры и землетрясения. Скорость самых медленных фронтов составляет 0,01-0,1 км/год. Можно выделить в модели медленные деформационные фронты и расчетом определить их географическое расположение, которое за 100 лет изменится всего на 1-50 км. Расположение медленных фронтов фактически определяет карту наиболее опасных геодинамических зон.

При использовании модели для оценок геотектонического риска в опасных геодинамических зонах выявляются все объекты с повышенной вероятностью возникновения катастроф при их деформациях или разрушении. Это могут быть опасные промышленные установки, мосты и плотины большой протяженности, отстойники промышленных токсичных отходов, высотные сооружения, участки нефтепроводов и газопроводов, горные склоны, подверженные камнепадам и оползням.

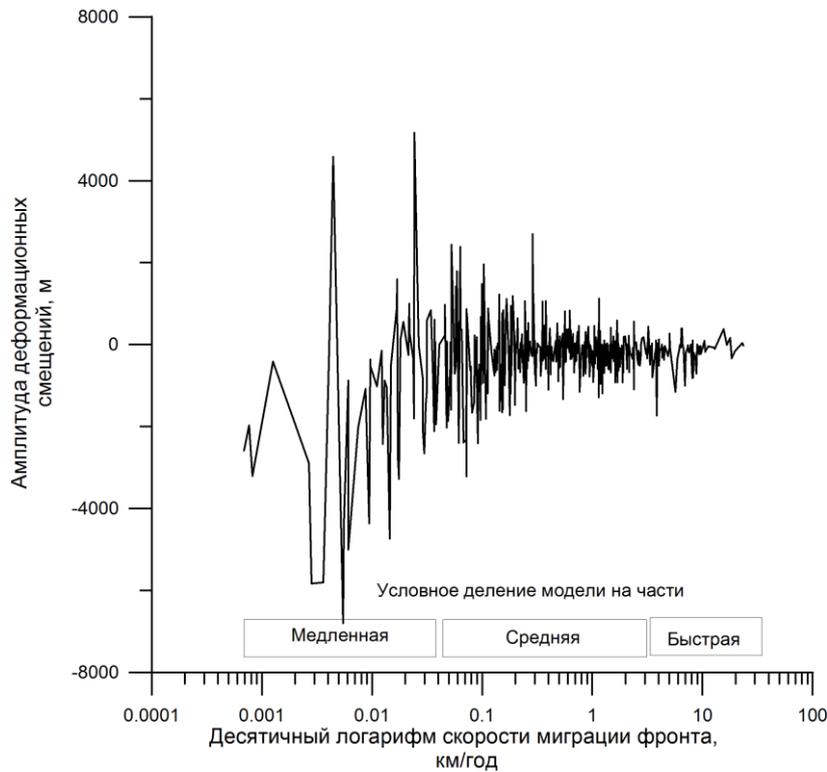


Рис. 3. Зависимость амплитуд фронтов от скорости миграции и деление модели на части.

На **рис. 4** показана карта на 2018 год первого инварианта деформационного тензора, которая характеризуют степень объемного расширения или сжатия среды (дилатация). На карту нанесены наиболее сильные землетрясения уральского региона за 150 лет. Катав-Ивановское землетрясение 2018 г. (M5.9-5.8) отмечается аномальной зоной растяжения на глубине 40 км.

мальной зоной растяжения на глубине 40 км.

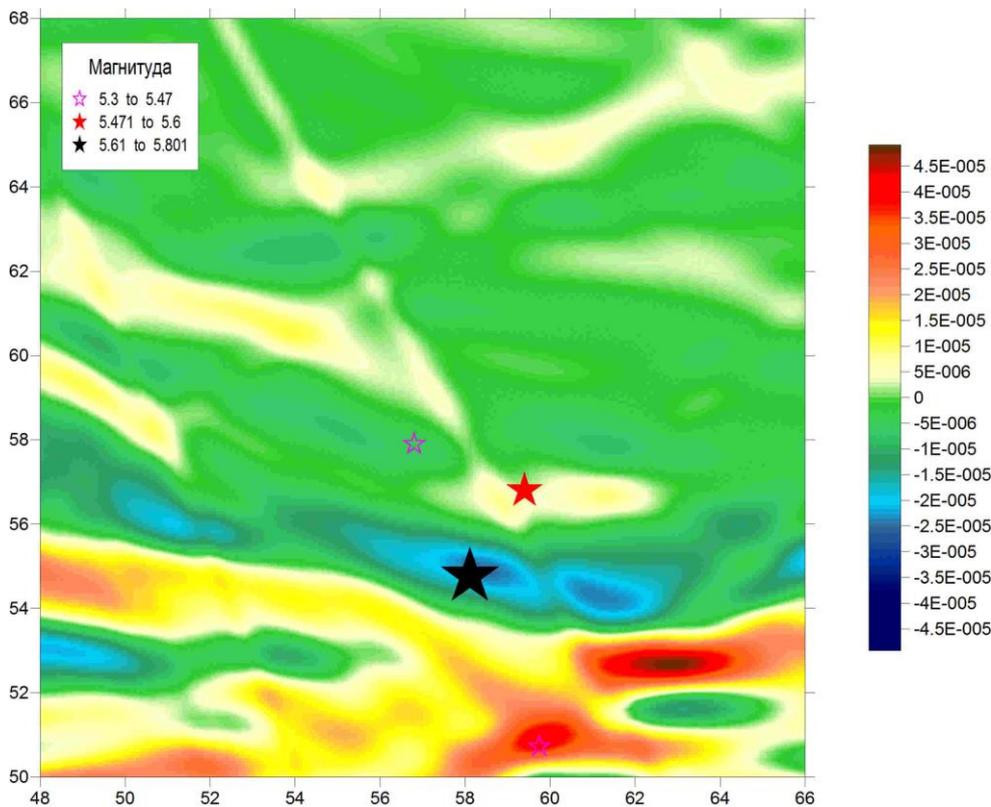


Рис. 4. Карта первого инварианта деформационного тензора на 2018 год. Глубина расчета 40 км. Катав-Ивановское землетрясение (черная звезда) отмечается аномальной зоной растяжения.

Модель позволяет рассчитывать все компоненты и инварианты на любой момент времени. На **рис. 5** показан пример расчета сцен для отдельных лет и дано сравнение с сейсмическими событиями в это время. Подавляющее большинство сейсмических событий совпадает с аномальными деформационными зонами. Для аномальных зон и отдельных пунктов далее может быть выполнена детализация как по глубине, так и по дискретности расчета.

Тестирование модели выполнялось как на точных теоретических моделях, так и на практических сейсмических каталогах (Нусипов, Овчаренко, 2007; Современная геодинамика ..., 2004) и показало неплохую точность краткосрочного прогноза сейсмических событий и опасных геодинамических явлений (10-30 км по долготе и широте, 1-2 месяца по времени).

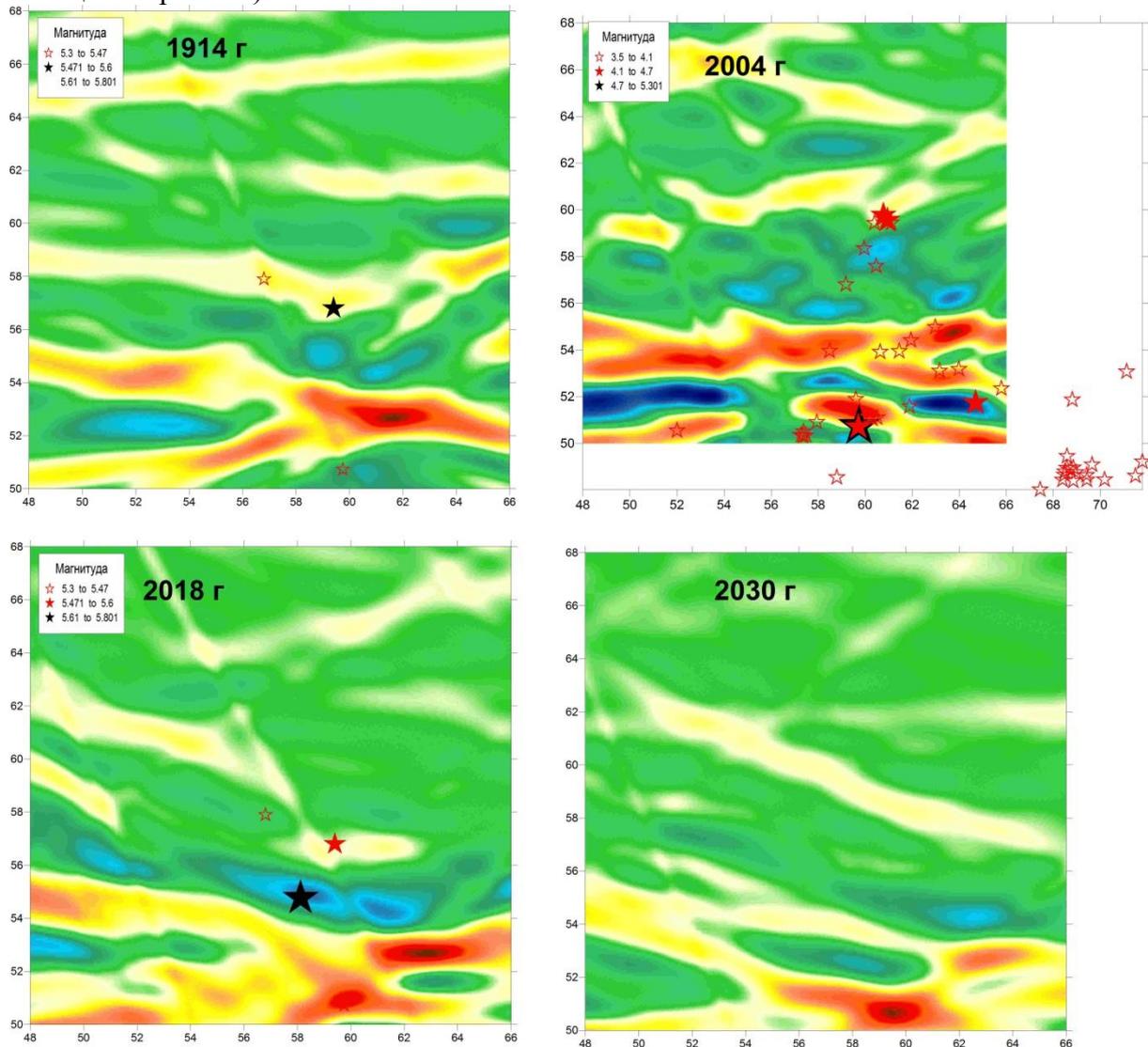


Рис. 5. Сравнение динамической модели деформаций и сейсмического процесса в разные годы.

При анализе периодов геодинамической опасности для протяженных плотин, мостов и т. п. объектов рассчитываются временные ряды инвариант тензора природных деформаций объекта.

$$E_l = \frac{L_0 - L(t)}{L} = \frac{\sqrt{(xa - xb)^2 + (ya - yb)^2} - \sqrt{(xa + Exa - xb - Exb)^2 + (ya + Eya - yb - Eyb)^2}}{\sqrt{(xa - xb)^2 + (ya - yb)^2}}, \quad (2)$$

Здесь a , b - крайние точки объекта; L - его длина; Ex , Ey - деформационные смещения, которые дает 4D-модель для точек a и b .

Расчетный график (рис. 6) для плотины Катав-Ивановского пруда показывает, что на длительный период отсутствует повышенная природная геодинамическая опасность для изучаемого объекта. Аналогичный расчет для плотины В-11 Теченского каскада водоемов показан на рис. 7.

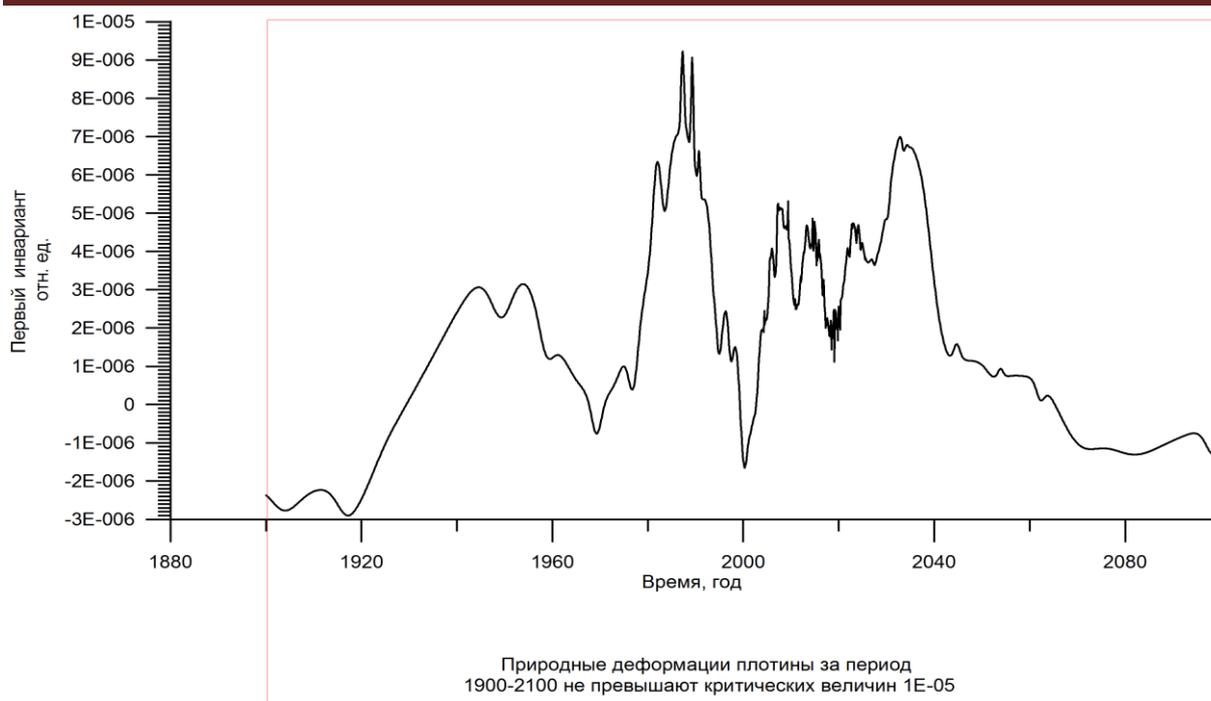


Рис. 6. Линейные деформации плотины Катав-Ивановского пруда по 4D-модели (2018) Уральского региона

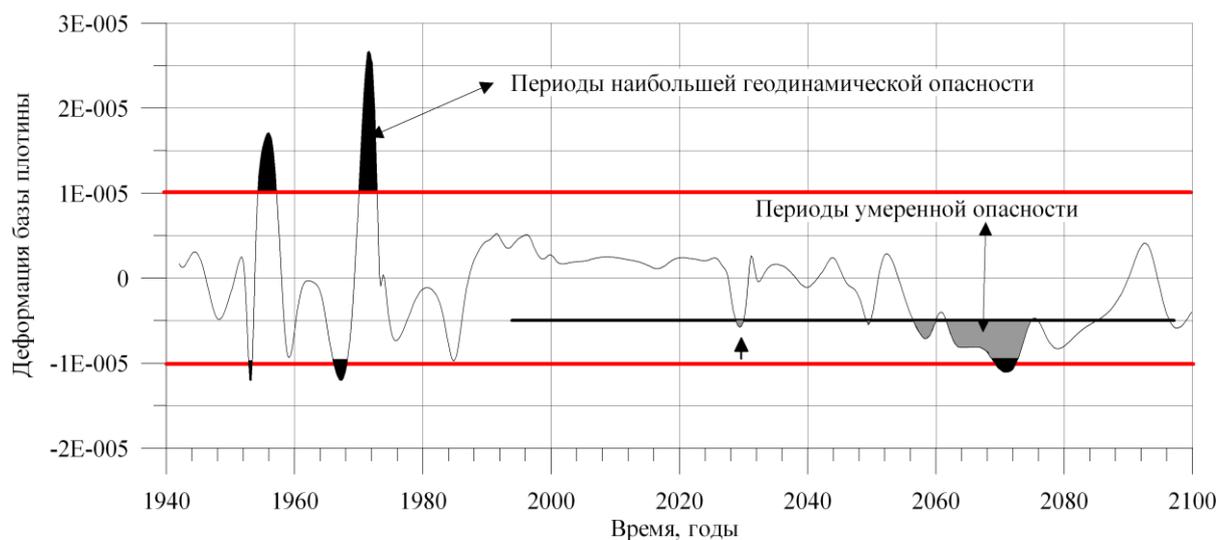


Рис. 7. Выявление периодов повышенной геодинамической опасности для плотины В-11 Теченского каскада водоемов. Выделены периоды повышенной и умеренной геодинамической опасности. Первый ближайший период умеренной опасности за счет геодинамического фактора начинается около 2030 года, а повышенной опасности в 2070 году.

Заключение

Таким образом, 4D-модель природного деформационного процесса позволяет рассчитывать площадные сцены и временные ряды для произвольных областей и точек как за прошлое время, так и на будущее. Разделение модели на условные части (медленную, среднюю и быструю) дает возможность выделять относительно устойчивые во времени и пространстве опасные геодинамические зоны с выяснением периодов геодинамической опасности. Периоды повышенной геодинамической опасности могут быть вычислены также для любого объекта с оценкой его максимальных деформаций. Наиболее

надежной информацией для амплитудной калибровки модели в настоящее время являются данные наземного и спутникового мониторинга гравитационного поля, а также данные GPS-мониторинга перманентными станциями.

Работа выполнена по плану НИР Института геофизики УрО РАН № з/р АААА-А18-118020790010-1; номер темы ФАНО (394-2018-0007).

Список использованной литературы

Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Книга 1. Землетрясения // Под ред. Шарова Н.В., Маловичко А.А., Шукина Ю.К. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 381 с.

Кашубин С.Н., Дружинин В.С. Гуляев А.Н. и др. Сейсмичность и сейсмическое районирование Уральского региона. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 124 с.

Кособоков В.Г. Прогноз землетрясений: Основы, реализация, перспективы // Вычислительная сейсмология. 2005. Вып. 36. Часть I. 179 с.

Николаевский В.Н. Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // ДАН. 1995. Т. 341. № 3. С. 403-405.

Николаевский В.Н. Разломы в земной коре и тектонические волны // Электронный научно-информационный журнал «Вестник ОГГГН РАН». 2001. № 1 (16) (http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2001/nikolaevsky.htm#begin).

Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К. Теория быстрых тектонических волн // Прикладная математика и механика. 1985. Т. 49. Вып. 3. С. 462-469.

Нусипов Е., Овчаренко А.В. Аппроксимационные динамические модели современного деформирования и сейсмичности земной коры Казахстана. Алматы, «БЫЛЫМ», 2007. 220 с.

Овчаренко А.В. Динамические модели деформационных процессов в земной коре и сейсмологический прогноз // ДАН. 1998. Т. 359, № 2. С. 51-254.

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.

Современная геодинамика и сейсмический риск Центральной Азии. Доклады V Казахстанского-Китайского международного симпозиума. Алматы: Институт сейсмологии МОН РК, 2004. 314 с.

Dobrovolsky I.P. The Preparation of a Strong Earthquake // Journal of Earthquake Prediction Research. (China-Russia). 1993. Vol. 2. No. 1. P. 17-34.

Рецензент статьи: кандидат геолого-минералогических наук, заведующий геофизической обсерваторией «АРТИ» О.А. Кусонский.