ГЕОТЕХНОЛОГИИ ВИБРАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ХХІ ВЕКЕ

А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, В.В. Ковалевский, М.С. Хайретдинов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

Дана краткая характеристика разработанных и реализованных авторами оригинальных вибрационных геотехнологий, предназначенных для решения широкого круга народнохозяйственных и прикладных задач. Основой геотехнологий являются мощные сейсмические вибраторы, созданные в Сибирском отделении РАН.

Ключевые слова: сейсмические вибраторы, вибрационные геотехнологии, вибросейсмический мониторинг, сейсмовулканоопасные зоны, земные приливы, глубинное зондирование Земли, вибросейсмическая калибровка, взрывы, геоэкологические риски.

GEOTECHNOLOGIES OF VIBRATIONAL SOUNDING IN XXI CENTURY

A.S. Alekseev, B.M. Glinsky, V.V. Kovalevsky, M.S. Khairetdinov Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

In the report the short characteristic of the original vibrational geotechnologies developed and realized by authors for the decision of a wide range of technical and applied problems is given.

Basis of geotechnologies are the powerful seismic vibrators created in the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Keywords: seismic powerful vibrators, vibrational geotechnologies, vibroseismic-acoustic monitoring, seismic-volcano prone zones, earth tides, deep sound of earth, vibroseismic calibration, explosions, geoecological risks.

Введение

Последние 30 лет XX века и 15 лет начала XXI века были ознаменованы созданием и внедрением мощных вибраторов в практику сейсмологических исследований. Основной побудительная причина развития этого процесса была связана с фундаментальной задачей изучения внутреннего строения Земли, а также динамики развивающихся разрушительных геофизических процессов в ее недрах.

В отличие от традиционно используемых для этих целей мощных взрывов и землетрясений, наносящих большие экологические ущербы для окружающей социальной и природной среды, вибрационные источники обладают несомненными преимуществами:

- точно определенные координаты источника и времени начала его работы;

– многократное воспроизведение идентичных воздействий на изучаемую среду (повторяемость эксперимента);

- возможность возбуждения колебаний заранее заданной формы и поляризации;

- возможность автоматизации управления экспериментом на компьютерной основе;

- повсеместность применения, включая густозаселенные и несейсмоактивные зоны;

– экологическая безопасность, так как регистрируемый сигнал находится под микросейсмами, а необходимые соотношения сигнал/шум обеспечиваются накоплением слабых

сейсмами, а необходимые соотношения сигнал/шум обеспечиваются накоплением слабых сигналов.

На основе вибраторов, созданных в СО РАН, были разработаны новые геотехнологии, которые позволяют избежать ряда ограничительных обстоятельств сейсмологии землетрясений и больших взрывов. Технической основой создания новых геотехнологий явилась разработка ряда мощных низкочастотных управляемых вибраторов. Ставилась задача обеспечить глубинность вибросейсмических просвечиваний по крайней мере до подошвы земной

[©] А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, В.В. Ковалевский, М.С. Хайретдинов, 2017

коры (40–50 км) и достижение дальности зондирования до 1000 км и свыше. По теоретическим расчетам для этой цели требовался вибратор с амплитудой возмущающей силы не менее 100 тонн-сил в частотном диапазоне 2÷15 Гц. В результате поисковых разработок были созданы и экспериментально опробованы несколько разных конструктивных схем вибрационных источников и вибровозбудителей, наиболее эффективными из которых оказались электромеханические дебалансные вибраторы ЦВ-40, ЦВ-100, ЦВО-100, создающие вертикально поляризованную возмущающую силу с амплитудой до 100 тс в диапазоне частот 5– 12 Гц с помощью синхронно вращающихся дебалансов [1].

Другая линия построения и развития вибраторов была основана на резонансной схеме излучения с помощью горизонтально колеблющейся инерционной массы до 300 тонн в диапазоне частот 1–3 Гц (горизонтальный сейсмический вибратор ГСВ-100) либо с помощью колеблющегося столба жидкости в вертикальной или горизонтальной плоскости. К числу последних двух относятся гидрорезонансные вибраторы ГРВ-50 (амплитуда силы 50 тс, диапазон частот 1–15 Гц), ГРВ-200 (амплитуда силы 250 тонно-сил, диапазон частот 1–10 Гц) [1].

Наряду с мощными вибрационными источниками были разработаны многоканальные полевые комплексы регистрации и обработки данных (ВИРС, РОСА) с набором оригинальных программ для оперативного анализа сейсмических сигналов и измерения основных параметров сейсмических волновых полей. Для численного моделирования процессов вибрационного зондирования земной коры разработана библиотека программ, позволяющая решать сложные задачи распространения сейсмических колебаний в сложнопостроенных трехмерных средах [2].

Новые вибрационные геотехнологии

Созданные источники и программно-регистрирующие комплексы явились основой развития ряда вибрационных геотехнологий. Наиболее развитыми из них на сегодня являются:

– технология исследования глубинного строения земной коры и верхней мантии территории Сибири;

 – технология активного вибросейсмического мониторинга зон подготовки природных и техногенных катастроф с целью повышения достоверности их прогноза. В первую очередь, сюда относятся сейсмовулканоопасные зоны;

- технология инженерно-сейсмических исследований сейсмоустойчивости зданий и сооружений;

- технология повышения нефтеотдачи выработанных пластов;

 технология вибросейсмической калибровки сейсмотрасс и сейсмостанций с целью повышения точности локации мест проведения скрытных подземных ядерных взрывов в интересах поддержания Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) от 10.09.1996 г.

Вибрационные источники наряду с основными сейсмическими колебаниями в земле способны излучать акустические колебания в атмосферу, представляя этим самым класс инфранизкочастотных акустических источников, не имеющих аналогов в мире [3]. Это свойство источников используется в интересах технологии экологоохранного прогнозирования геоэкологических рисков от мощных взрывов [4].

Из-за ограниченности размеров статьи остановимся на краткой характеристике лишь некоторых технологий.

Технология активного вибросейсмического мониторинга (ABCM) предусматривает наблюдения за состоянием земной коры по изменению характеристик распространения сейсмических волн, возбуждаемых вибрационным источником сейсмических колебаний. Наиболее важная область применения технологии связана с изучением вариаций напряженно-деформированного состояния земной коры, предшествующих землетрясениям и извержениям вулканов. В конечном счете, эта проблема связана с поиском предвестников природных катастроф.

Изучение напряженного состояния земной коры и его изменения во времени – задача, требующая прецизионной точности при экспериментальных работах с мощными вибраторами. Данная технология основывается на регулярном зондировании зон назревающих катастроф сейсмическими полями от вибраторов со строго заданными энергетическими, частотно-временными и фазовыми характеристиками. Периодичность зондирования определяется скоростью протекания геодинамических процессов в рассматриваемых зонах. Динамика последних отображается в характеристиках регистрируемых вибросейсмических полей. Чувствительность используемого вибросейсмического метода зондирования проверялась на естественном тесте, основанном на лунно-солнечных приливах, сопровождающихся упругими деформациями земной коры. С этой целью был разработан новый метод выявления приливных деформации на основе оценивания спектра полей амплитуд и фаз гармонических колебаний вибратора в дальней зоне [5]. На основе экспериментов, выполненных в периоды земных приливов на трассах протяженностью 355-430 км в Алтайском регионе была достигнута точность измерений вариаций скоростей волн на уровне 10⁻⁶. Полученные результаты на 2-3 порядка превосходят по точности ранее полученные американскими и норвежскими исследователями. Это стало возможным лишь благодаря использованию высокочувствительного вибросейсмического метода. Схематически технология вибрационного мониторинга представлена на рис. 1.Экспериментальными работами, основанными на использовании строго повторяющихся сеансов зондирования гармоническими сигналами на частоте 6.75 Гц и длительностью 1500 с, обнаружены суточные и полусуточные периодичности, обусловленные земными приливами.

Цикл экспериментальных работ по вибросейсмическому мониторингу среды во времени заложил основы методики исследования медленных тектонических процессов, происходящих в земной коре.



Экспериментальная оценка относительного изменения скоростей сейсмических волн по результатам измерений земных приливов составляет $10^{-5} - 10^{-6}$

Рис. 1. Технология вибрационного мониторинга

Важной задачей вибрационного просвечивания среды яваляется изучение сложного сейсмического поля в районе живущих вулканов. Экспериментальные работы в этой части были выполнены в районах действующих грязевых вулканов Таманской грязевулканической провинции (Краснодарский край) – вулкан Шуго и вулкан Карабетова – совместными усилиями коллективов ИВМиМГ СО РАН, ИФЗ РАН и КубГУ [6]. На рис. 2 представлены основные компоненты применяемой технологии: передвижной вибратор CB-10/100, аппара-

тура регистрации и обработки сейсмических сигналов РОСА и непосредственно объект исследования – вулкан. Зондирование вулканов осуществлялось свип-сигналами длительностью 60с в диапазоне частот 10–60 Гц.



Рис. 2. Схема зондирования грязевого вулкана Шуго

Как результат вибрационного зондирования вулкана «гора Карабетова», осуществленного в последовательных точках Т1-Т7 (рис. 3). На рис. 4 представлен восстановленный сейсмический разрез вулкана. Здесь отражены его основные особенности-форма выхода на дневную поверхность Земли, его жерло. Такая структура получена вибрационным методом впервые.



Рис. 3. Вибросейсмическое просвечивание зоны вулкана Карабетова в точках T1-T7. Синим цветом указан профиль регистрации

Рис. 4. Сейсмический разрез вулкана «Карабетова гора»

Технология калибровки трасс распространения сейсмических волн и сейсмических станций

Эффективность систем контроля за ядерными испытаниями, землетрясениями зависит от точности определения параметров источников сейсмических событий – времен происхождения, географических координат, глубины, а также их мощности. Точность вычислений влияет на достоверность идентификации событий. Как известно, основная трудность точного определения параметров сейсмического источника связана с существенной горизонтальной и вертикальной неоднородностью коры и верхней мантии Земли, которая вносит большие вариации параметров сейсмических волн в зависимости от расстояния и азимута на источник. Рассматриваемая технология калибровки направлена на учет указанных неоднородностей на основе калибровочного зондирования сейсмотрасс от предполагаемых источников до сейсмостанций с помощью мощных вибраторов.

Она имеет ряд физических и экологических преимуществ перед методом больших химических калибровочных взрывов, основные из которых были отмечены выше.

Результаты экспериментов по виброГСЗ (вибрационное глубинное сейсмическое зондирование) на дальностях до 500 км в режиме зондирования свип-сигналами и до 1000 км и свыше в режиме зондирования гармоническими сигналами подтверждают возможость уверенного выделения волн в интересах решения задач калибровки. При этом точность определения времен первых вступлений может повышаться за счет синхронного суммирования вибрационных сейсмограмм благодаря высокой повторяемости их динамических характеристик от сеанса к сеансу в заданном пункте регистрации. Одновременно при этом открываются возможности наращивании дальности регистрации.

Одна из основных задач, стоящая перед вибросейсмической калибровкой, связана с доказательством эквивалентности волновых полей от взрывов и вибраторов на протяженных трассах распространения сейсмических волн. Это обусловлено тем, что исторически методы интерпретации сейсмограмм развивались по отношению к взрывным сейсмограммам, поэтому переход к вибрационной технологии калибровки обусловил приемственность старых методов интерпретации. Указанная эквивалентность была доказана в ряде экспериментов с использованием вибраторов и взрывов на одних и тех же трассах [7; 8].

Пример высокой взаимной эквивалентности обоих видов полей иллюстрируется с помощью сейсмических разрезов, представленных на рис. 5. Разрезы получены для профиля протяженностью до 400 км с использованием излучающей группы из двух вибраторов типа ЦВ-40 и химических взрывов мощностью 5–6 т в тротиловом эквиваленте.



Рис. 5. Сравнение качества взрывных и вибрационных сейсмограмм, полученных при глубинных сейсмических исследованиях на профиле протяженностью 400 км

Другая задача, стоящая перед вибросейсмической калибровкой, связана с точностью оценивания азимутальных скоростных неоднородностей в земле. С этой целью выполнены эксперименты по точности оценивания скоростей продольных волн на трассе «Быстровка-Залесово-Новокузнецк и проведено сравнение полученных оценок с ранее полученными с помощью взрывов. Доказана высокая сопоставимость полученных результатов [7].

Вибрационная геотехнология оценивания геоэкологических рисков от мощных взрывов, землетрясений

Известно, что мощные взрывы являются источниками ударных воздушных и сейсмических волн, оказывающих разрушительное воздействие на промышленные и жилые объекты, ударное воздействие на биообъекты. Такие процессы, например, развиваются во время взрывов в зонах открытых промышленных карьеров, полигонов при утилизации боеприпасов, извержения грязевых и магматических вулканов, землетрясений и др. Следует отметить их слабую изученность от воздействия внешних метеофакторов, включающих в себя, в первую очередь, направление и скорость ветра, температуру и влажность окружающего воздуха, турбулентность атмосферы. Комплексное воздействие их на распространение акустических волн может приводить к многократному усилению разрушительного воздействия взрывов на окружающую среду на определенных азимутальных направлениях. Этоопределяет необходимость прогнозирования рисков от массовых взрывов с учетом воздействия указанных факторов.

Ударное акустическое воздействие взрывов на окружающую среду оценивается *удель*ной плотностью энергии:

$$E = \frac{1}{\rho c} \int_{0}^{T} p^{2}(t) dt.$$
 (1)

Здесь ρc – удельное акустическое сопротивление воздуха, равное 42 г/(см²·с); p(t) – акустическое давление, регистрируемое на выходе акустического датчика; T – длительность акустической волны. В (1) акустическое давление является функцией многих параметров, определяемых условиями излучения и дальнего распространения акустических колебаний, метеопараметрами, покровом и геологическими неоднородностями дневной поверхности. Таким образом, решение (1) имеет многофакторную природу [9]. В качестве одного из решений рассмотрено влияние метеофакторов- направления и скорости ветра на распространение инфразвука, порождаемого сейсмическими вибраторами ЦВ-40, ЦВ-100. В результате такого взаимодействия возникает явление пространственной фокусировки акустических колебаний, при которой максимум акустического давления p достигается при совпадении направлений фронтов распространения колебаний от вибратора и ветра. Описывается такое явление с помощью *фактора фокусировки*, равного отношению интенсивности инфразвука в неоднородной движущейся среде к интенсивности его в безграничной неподвижной среде [6]:

$$f = I[z, \theta, \varphi] / I_0, \qquad (2)$$

где сферические углы θ (зенитный угол) и φ (азимут) характеризуют начальное направление луча от источника по отношению к вертикальной координате *z* и горизонтальной оси *x* соответственно. При этом направление последней совпадает с направлением ветра. Более подробно методика расчета (2) представлена в [4].

В экспериментальном плане для оценивания фактора фокусировки инфранизкочастотных акустических колебаний использовались сейсмический вибратор ЦВ-40, базирующийся на Быстровском полигоне (Новосибирская область), и взрывы утилизируемых боеприпасов на полигоне Шилово (Новосибирская обл.). В обоих случаях применялся принцип регистрации акустических колебаний с помощью круговой расстановки датчиков (рис. 6).

В центре каждой отдельно взятой расстановки находится один из источников: либо вибрационный источник ЦВ-40 (рис. 7), либо взрывы с тротиловым эквивалентом 125 кг. В методическом плане в экспериментах изучалось воздействие направления и скорости ветра на распространение акустических волн от обоих источников.

Из анализа полученных экспериментальных данных видно, что ветровая зависимость уровней инфразвука характеризует остро выраженную азимутальную направленность распространения акустических колебаний, описываемой уравнением (2). В частности, как следует из рис. 8, соотношение максимального и минимального значений акустического давления на разных азимутальных направлениях может достигать 50 раз. С учетом такого перераспределения акустического давления по пространству следует важный вывод, что даже

маломощные взрывы могут становиться экологически опасными вследствие многократного увеличения потока энергии в определенном направлении, определяющим направление главного ударного воздействия инфразвука. Оцененные по экспериментальным данным эффекты пространственной фокусировки акустических волн от взрывов на полигоне Шилово имеют аналогичный острорезонансный характер (рис. 9).



Рис. 6. Карта расстановки источников и датчиков для регистрации сейсмоакустических колебаний от сейсмического вибратора ЦВ-40 (стрелка) и взрывов на полигоне Шилово (звездочка)



Рис. 8. Графики зависимости акустического давления от азимута в зависимости от ветра при регистрации колебаний от вибратора ЦВ-40. Красная линия – случай круговой расстановки датчиков с радиусом 6 км при скорости ветра 2–4 м/с; голубая линия – соответственно 12 км и 4–6 м/с







Рис. 9. Зависимость акустического давления от азимута для полигонного взрыва мощностью 125 кг, силе ветра 1 м/с и расстановки датчиков по кругу с радиусом 10 км (график голубого цвета). Ослабление уровня акустического давления по отношению к его уровню в контрольной точке на удалении 0,457 км от места взрыва (график красного цвета). Значения коэффициентов ослабления приведены справа

Допустимые акустические воздействия на объекты социальной инфраструктуры определяются табулированными критическими значениями удельной плотности энергии в единицах Дж/м2 [10]. В частности, для жилого здания при однократном взрыве критической является величина 1000 Дж/м², для оконного стекла толщиной 2-3 мм -15 Дж/м, для человека – 3 Дж/м². По отношению к полигонным взрывам, характеризуемым мощностью в тротиловом эквиваленте около 125 кг, в соответствии с (1) были получены оценки удельной акустической энергии в точках 1-11 круговой расстановки датчиков с радиусом 10 км (рис. 1), а также в контрольной точке вблизи взрыва (на удалении от эпицентра 0.5 км). В качестве примера на рис. 5 приводятся соотношения значений удельной плотности энергии (1) от взрывов с критическими значениями для разных объектов. Номера столбцов 1-4 соответствуют типам объектов, 5, 6 – значениям удельной энергии от взрыва на расстояниях от 0.5 и 10 км соответственно. Допустимые и измеренные значения удельной энергии проставлены сверху над каждым столбиком. Представленный рисунок характеризует уровень опасности взрывов данной мощности для разных типов объектов. В частности, видно, что взрыв с тротиловым эквивалентом в 125 кг на удалении 0.5 км является разрушительным для строений и тем более опасен для человека, поскольку превышение допустимой нормы составляет ориентировочно 400 раз.



Рис. 10. Критические значения удельной энергии для строений: 1 – жилое здание при однократном взрыве; 2 – жилое здание при многкратных взрывах; 3 – оконное стекло толщиной 2–3 мм; 4 – для человека. Значения удельной энергии от взрыва: 5 – на удалении от взрыва 0.5 км; 6 – на удалении 10 км

Перспективы развития вибросейсмических технологий

Одно из перспективных направлений работ по вибрационному зондированию связано с увеличением дальности глубинного зондирования Земли до нескольких тысяч км с целью достижения показателей сейсмологии землетрясений и класса килотонных взрывов. Это потребует кардинального увеличения силовых параметров источников- амплитуды возмущающей силы и соответственно излучаемой сейсмической энергии, прежде всего, наиболее скоростных продольных волн. Потребные оценки этих параметров могут быть получены из какалибровочных кривых затухания продольных волн Р в диапазоне 100–10000 км. В сейсмологии такие кривые являются результатом усреднения по множеству данных регистрации ядерных и промышленных взрывов, землетрясений и соответственно отражают закономерность ослабления сейсмических волн по расстоянию. Вид их представлен рис. 11. Особенность представленных графиков состоит в том, что они описывают в логарифмическом масштабе закономерность затухания волн в диапазоне 100–900 км по линейному закону. В диапазоне 900–1100 км амплитуда волн практически постоянна и далее нарастает по мере выхода из зоны тени с последующим спадом до расстояний 10000 км и свыше. Очевидно, располагая численными оценками амплитуд волн, зарегистрированных от определенного

типа вибратора на определенном расстоянии с заданным соотношением сигнал шум, можно спрогнозировать требования к силовым характеристикам источника в диапазоне больших расстояний [11]. В качестве примера такие оценки получены по отношению к выделению широкополосных свип-сигналов, излучаемых центробежным вибратором в полосе частот 5–10 Гц. Соответствующие оценки возбуждающей силы F и мощности N представлены справа от графиков. В частности, для центробежного вибратора ЦВ-100 с амплитудой возмущающей силы 100 тс дальность приема свип сигналов с требуемой помехоустойчивостью составляет около 500 км.



Рис. 11

На дальности в 1000 км потребная возмущающая сила возрастет до 1000 тс, на 10000 км – до 2000 тс. Потребная мощность сейсмических волн для трех рассмотренных случаев последовательно составит 100, 10000, 4000 квт. По отношению к монохроматическим сигналам, обладающим на порядок более высокой помехоустойчивостью, приведенные оценки могут быть существенно ниже.

Для поверхностного источника рыхлая верхняя часть Земли является хорошим глушителем упругих волн. В частности, численными расчетами показано [12], что для таких источников соотношение мощностей продольных, поперечных и поверностных волн составляет как 7 % : 25 % : 68 %. Таким образом, основная сейсмическая мощность уходит в излучение поверхностных волн. Этого недостатка лишен скважинный вибратор. Перспектива создания такого источника увязывается с созданием подземного гидрорезонансного вибратора.

Существенной и принципиально важной научно-технической проблемой является создание мощного (1500–2000 тонн), прецизионно управляемого, относительно дешевого, экологически безопасного виброисточника. Разработка проекта такого источника уже ведется. В техническом отношении он может основываться на принципах, предложенных и опробованных на 40- и 100-тонных вибраторах дебалансного типа (ЦВ-100) или гидрорезонансного типа (ГРВ-50) в ходе многолетних работ по вибрационному просвечиваю Земли. Основным требованиям создания источников 1000-тонного класса могут удовлетворять конструкции, в которых реализованы резонансные схемы построения источников. Это источники с массой порядка 1000–2000 тонн, установленной на пневмопружине, либо использующие упругие свойства грунта, а также в виде обоймы заполненных водой двойных по объему нефтяных железнодорожных цистерн, заглубленных в землю и синхронно управляемых программой компьютера [11]. Для создания сверхмощных сейсмоизлучателей на гидрорезонансном принципе могут быть использованы демонтированные пустые шахты для запуска баллистических ракет (рис. 12) Конструктивно они полностью соответствуют техническим требованиям для создания источников, необходимых для глобальной вибрационного просвечивания Земли. Физико-математическая модель такого источника дана в [13].



Рис. 12

С целью практической реализации целей проекта предполагается создать два вибросейсмических стационарных центра излучения: под Новосибирском (в пос. Быстровка) и около оз. Байкал (в пос. Бабушкин) и в последующем удлинить профиль за счет центров в Ханты-Мансийском округе и вблизи г. Хабаровска (рис. 13).

Запись колебаний может выполняться имеющимися в СО РАН передвижными цифровыми системами регистрации. Их можно использовать как с расположением вдоль основного профиля, так и с выносом по перечным направлениям до 500–1000 км от профиля. Будет возможна организация наблюдений по сейсморазведочным схемам 2D и 3D сейсмики, и, следовательно, возможно получение трехмерных изображений и численных моделей тектонических элементов в мантии Земли. Не исключена возможность использования записей промышленных сейсмостанций, ведущих геологоразведочные работы в регионе.

Использование мощных вибрационных источников позволяет снизить затраты на организацию источников возбуждения и открывает широкие возможности проведения глубинных сейсмических исследований в промышленных районах, территориях национальных заповедников (например, 100 километровая заповедная зона вокруг оз. Байкал) и др., где невозможно проведение стандартных буровзрывных работ. Примерные расчеты показывают, что экономический эффект за счет использования мощных вибраторов при изучении глубинного строения регионов Сибири в настоящее время составляет при выполнении одного детального 100-километрового профиля ГСЗ-ОГТ с расстоянием между источниками возбуждения в 1 км и базами зондироааний до 150 км позволит сэкономить от 4 до 5 млн рублей. Для Сибири общая потребность в профилях ГСЗ составляет десятки тысяч погонных километров.



Рис. 13. Проект транссибирского профиля с 1000-тонными вибраторами

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / отв. ред. Г.М. Цибульчик. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал «Гео» издательства СО РАН, 2004. 387 с.

2. Михайленко Б.Г., Глинский Б.М., Имомназаров Х.Х., Ковалевский В.В., Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Хайретдинов М.С. Методы активной сейсмологии в задачах мониторинга глубинного строения Земли // Экстремальные природные явления и катастрофы. Т. 1: Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений / отв. ред. А.О. Глико; отв. сост. А.Л. Собисевич. М.: ИФЗ РАН, 2010. С. 89–130.

3. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Дряхлов С.И., Ковалевский В.В., Михайленко Б.Г., Пушной Б.М., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С., Шорохов М.Н. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании //Доклады АН. 1996. Т. 346, № 5. С. 664–667.

4. Хайретдинов М.С., Ковалевский В.В., Воскобойникова Г.М., Седухина Г.Ф. Оценивание метеозависимых геоэкологических рисков от взрывов с помощью сейсмических вибраторов // Технологии сейсморазведки. 2016. № 3. С. 132–138.

5. *Glinskii B.M., Kovalevskii V.V., Khairetdinov M.S.* Relationship of wave fields from powerfull vibrators with atmospheric and geodynamics processes // Geology and Geophysics. 1999. Vol. 40, no. 3. P. 422–431.

6. Глинский Б.М., Собисевич А.Л., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С. Математическое моделирование и экспериментальные исследования грязевого вулкана Шуго // Вулканология и сейсмология. 2008. № 4. С. 1–7.

7. Глинский Б.М., Еманов А.Ф., Ковалевский В.В., Соловьев В.М., Хайретдинов М.С. Экспериментальные исследования по вибросейсмической калибровке сейсмических трасс // Геофизика и математика XXI в. Современные математические и геологические модели в задачах прикладной геофизики: избр. науч. тр. / под ред. акад. РАН В.Н. Страхова. М.: ОИФЗ РАН, 2001. С. 153–165.

8. Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Ефимов А.С., Сальников А.С., Чичинини И.С. и *др.* Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем востоке России // Проблемы информатики. 2013. №3. С. 30–41. 9. Хайретдинов М.С., Ковалевский В.В. Вибрационные геотехнологии в экологоохранном прогнозировании // Сб. тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. «Инновационные, информационные и телекоммуникационные технологии». М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2017. С. 20–25.

10. Единые правила безопасности при взрывных работах. М.: НПО ОБТ, 1993. 238 с.

11. Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре и верхней мантии Земли // Интеграционные проекты: монография / кол. авт. Вып. 27. 2010. 309 с.

12. Гущин В.В., Докучаев В.П., Заславский Ю.М., Конюхова Н.Д. О распределении мощности между различными типами излучаемых волн в полубезграничной упругой среде // Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. М.: Наука, 1981. С. 113–118.

13. Ковалевский В.В., Конюх Г.В. Моделирование сверхмощного шахтного гидрорезонансного виброисточника // Тр. Междунар. конф. «Внутренне ядро-2000». М., 2001.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

А.Н. Кондратьев, К.А. Сидоренко, А.А. Васенина

Омский научно-исследовательский институт приборостроения, Омск, Российская Федерация

Приводится описание метода определения критической частоты слоя F2. Использованы методы статистического анализа данных для прогнозирования критических частот ионосферного слоя F2. Предложен алгоритм вычисления критической частоты на основе методов статистического анализа. В качестве верификационных данных использовалась критическая частота, получаемая методом вертикального зондирования ионосферы. Проведен анализ эффективности применения модифицированного алгоритма, основанного на методе наименьших квадратов, bagging и усреднённого алгоритма.

Ключевые слова: ионосферная модель, метод наименьших квадратов, деревья принятия решений.

FORECASTING CRITICAL FREQUENCY OF LAYER F2 ON THE BASED OF METHODS OF STATISTICAL ANALYSIS

A.N. Kondratyev, K.A. Sidorenko, A.A. Vasenina Omskiy Naucho Issledovatelskiy Institut Priborostroeniya, Omsk, Russian Federation

A description is provided of the method for determination the critical frequency of the layer F2. Methods of statistical data analysis are used to predict the critical frequencies of the ionospheric layer F2. The proposed an algorithm for calculating the critical frequency is based on the methods of statistical analysis. As verification data, the critical frequency obtained by the vertical sounding of the ionosphere was used. The analysis of efficiency the application of the modified algorithm based on the method of least squares, bagging and the averaged algorithm.

Keywords: ionospheric model, ordinary least squares, decision trees.

Введение

В последнее время к современным системам связи предъявляются всё более высокие требования к устойчивости и надежности, что в свою очередь приводит к необходимости улучшения методов прогнозирования ионосферы [1; 2]. Повышение точности прогнозирования достигается разработкой алгоритмов, адаптирующих математическую модель по данным текущей диагностики одного из параметров среды [1; 3]. В качестве такого параметра

[©] А.Н. Кондратьев, К.А. Сидоренко, А.А. Васенина, 2017