



УДК 550.348.64(571/55)

Кашковский Виктор Владимирович,*д. т. н., с. н. с., профессор кафедры «Информационные системы и защита информации», Иркутский государственный университет путей сообщения, тел. 8(914) 943-12-30, e-mail: kww542339@kn.ru***Семенов Рудольф Михайлович,***д. г.-м. н., в. н. с. лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии, Институт земной коры СО РАН, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, тел. 8(3952) 42-54-04, e-mail: semenov@crust.irk.ru***Лопатин Максим Николаевич,***преподаватель, Иркутский государственный университет, тел. 8(3952) 42-54-04, e-mail: flamewolf@mail.ru*

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

V. V. Kashkovski, R. M. Semenov, M. N. Lopatin

A SYSTEMATIC APPROACH FOR DEVELOPING METHODS OF EARTHQUAKE PREDICTION

Аннотация. Попытки прогноза землетрясений, основанные на контроле за изменениями концентрации гелия в подземных водах, показали, что из-за влияния случайных факторов на концентрацию гелия вероятность ложной тревоги существенно превышает вероятность верного прогноза землетрясения. Поэтому надежных методов среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений не было найдено до сих пор. В первую очередь это вызвано тем, что до настоящего времени не было создано адекватной модели, объясняющей взаимосвязь концентрации гелия в подземных водах с надвигающимся землетрясением. Существующие математические модели выделения гелия, формализованные экспериментальным путем, хорошо описывают суть происходящих процессов, но плохо пригодны для прогноза землетрясений на практике. В работе рассмотрено практическое применение системного подхода к решению проблемы оценки количественного влияния процесса подготовки и реализации очага землетрясения на концентрацию гелия в подземных водах. Предложена энергетическая модель подготовки и реализации очага землетрясения, объясняющая возникновение предвестников землетрясения различной физической природы. Решена проблема оценки количественного влияния процесса подготовки и реализации очага землетрясения на концентрацию гелия в подземных водах и предложен метод среднесрочного прогноза времени возникновения землетрясения. Приведены результаты изучения вариаций концентраций растворенного гелия в подземных водах Южного Прибайкалья, обусловленных сейсмическими процессами, и практические результаты по среднесрочному прогнозу близких и удаленных от Иркутска сейсмических процессов.

Ключевые слова: системный подход, система, объекты системы, Южное Прибайкалье, подземные воды, концентрации растворенного гелия, предвестники землетрясений, среднесрочный прогноз землетрясений, коэффициент корреляции, интегрированная индикаторная функция, очаг землетрясения.

Abstract. Attempts of earthquake prediction based on monitoring changes in the concentration of helium in groundwater showed that due to the influence of random factors on the concentration of helium, the probability of false alarm is significantly higher than the probability of correct prediction of the earthquake. Therefore, reliable methods of short and middle term prediction of earthquakes has not been found so far. Primarily this is because to date there has not been an adequate model created for explaining the relationship between the concentration of helium in groundwater with the impending earthquake. Existing mathematical models of helium excrete, formalized by experiment, describe well the essence of the processes, but poorly suite for earthquake prediction in practice. The paper considers practical application of the system approach to the solution of problems of an estimation of quantitative influence of the process of preparation and implementation of the earthquake on the concentration of helium in groundwater. The proposed energy model for the preparation and implementation of earthquake source explain the appearance of harbingers of earthquakes of different physical nature. The problem of assessing the quantitative influence of the process of preparation and implementation of the earthquake on the helium concentration in groundwater is solved and a method of the medium-term forecast the time of occurrence of the earthquake is proposed. The results of study of variations of the concentrations of dissolved helium in ground waters of South Baikal area caused by seismic processes, and practical results on the medium-term forecast of close and remote from Irkutsk seismic processes are given.

Keywords: systemic approach, system, system objects, South Baikal area, groundwater, concentrations of dissolved helium, earthquake precursors, medium-term earthquake prediction, correlation coefficient, integrated indicator function of the earthquake source.

Введение

При изучении предвестников катастрофического Ашхабадского землетрясения 1948 года и Ташкентского землетрясения 1966 года было установлено, что перед ними резко изменилась концентрация в подземных водах газов, таких как гелий, радон, водород, азот, пары ртути и др. Из числа перечисленных газов наблюдения за концентрацией гелия в подземных водах доста-

точно технологичны, они не требуют существенных финансовых затрат и достаточно широко освоены на практике. Возможность обрабатывать статистику по концентрации гелия в подземных водах в сейсмоопасных регионах дал надежду, что можно будет прогнозировать землетрясения по изменениям содержания гелия в подземных водах. Однако практически сразу же выяснилось, что концентрация гелия в подземных водах носит



случайный характер и зависит от множества факторов [1]. Попытки прогноза землетрясений, основанные на контроле за изменениями концентрации гелия

в подземных водах, показали, что из-за влияния случайных факторов на концентрацию гелия вероятность ложной тревоги существенно превышает вероятность верного прогноза землетрясения. Поэтому надежных методов среднесрочного и краткосрочного прогноза землетрясений не было найдено до сих пор. В первую очередь это вызвано тем, что до настоящего времени не было создано адекватной модели, объясняющей взаимосвязь концентрации гелия в подземных водах с надвигающимся землетрясением. Существующие математические модели выделения гелия, формализованные экспериментальным путем, хорошо описывают суть происходящих процессов, но плохо пригодны для прогноза землетрясений на практике. Таким образом, имеет место проблемная ситуация [2], когда существующая теория не в состоянии обработать статистические данные так, чтобы получить достоверный прогноз землетрясений. Анализ данной проблемной ситуации показал, что наиболее эффективным методом поиска путей её решения является системный подход.

Исходные данные для моделирования

Территория Южного Прибайкалья – одна из наиболее высокосейсмичных в России. Это обусловлено происходящими на этой территории рифтогенными процессами – растяжением литосферы, вызванным либо конвекцией в астеносфере и подкорковых потоках, либо следствием коллизии Индостана с Евразийской плитой. Комплексные данные позволяют заключить, что зона рифтогенеза является результатом совместных действий пассивного и активного механизмов растяжения литосферы при ведущей роли то одного, то другого механизма [3].

С 2007 года в Южном Прибайкалье ведутся измерения содержания гелия в подземных водах. Ежесуточное измерение концентрации гелия проводится на двух скважинах, расположенных в районе Иркутского водохранилища на Зеленом Мысе (средняя концентрация гелия – $He\ 1958.86 \cdot 10^{-5}$ мг/л) и в г. Иркутске (скважина К-ГИС, средняя концентрация $He\ 57.31 \cdot 10^{-5}$ мг/л). Кроме того, осуществляется измерение концентрации гелия в глубинной воде Байкала, получаемой из водозабора в районе п. Листвянка, средняя концентрация $He\ 5.95 \cdot 10^{-5}$ мг/л. Далее эти пункты наблюдения, вытянутые в одну линию, мы будем называть, соответственно, Листвянка (Л), Зеленый Мыс (З), и К-ГИС (К). По результатам наблюдения гелия в пунктах Л, З и К, полученных за весь период

наблюдения, нами были вычислены коэффициенты корреляции:

$\bar{r}_{Л-З} = 0,1218$ (расстояние Листвянка – Зеленый Мыс 36 км);

$\bar{r}_{Л-К} = 0,0334$ (расстояние Листвянка – К-ГИС 65 км);

$\bar{r}_{З-К} = 0,1593$ (расстояние Зеленый Мыс – К-ГИС 29 км).

Как следует из результатов наблюдения, чем больше расстояние между точками забора подземных вод, тем менее коррелированы колебания концентрации гелия в них.

Гелий относится к благородным газам. Атмосферный гелий состоит из изотопов 3He (0,00013 % по объему) и 4He . Гелий образуется в результате распада актиния, тория, урана. Гелиеносные природные газы содержат, как правило, до 2 % гелия по объему. Исключительно редко встречаются скопления газов, гелиеносность которых достигает 8–16 % [4].

Среднее содержание гелия в земном веществе – 0,003 мг/кг или 0,003 г/т. В основном земной гелий образуется при радиоактивном распаде урана-238, урана-235, тория и нестабильных продуктов их распада. Несравнимо меньшие количества гелия дает медленный распад самария-147 и висмута. Все эти элементы порождают только тяжелый изотоп гелия – 4He . Гелий в земной коре накапливается медленно. Одна тонна гранита, содержащая 2 г урана и 10 г тория, за миллион лет продуцирует всего 0,09 мг гелия – половину кубического сантиметра [4]. Из этого следует вывод, что процесс продуцирования гелия детерминирован и не зависит от внешних факторов.

Большинство минералов, содержащих гелий, с течением времени подвергаются процессам выветривания, перекристаллизации и т. д., и гелий из них уходит. Высвободившиеся из кристаллических структур гелиевые пузырьки отправляются в путешествие по земной коре. Очень незначительная часть их растворяется в подземных водах. Другая часть кочующего гелия через поры и трещины минералов выходит в атмосферу [4].

Таким образом, результаты многочисленных исследований (в том числе и наблюдения за гелием в Южном Прибайкалье) показали, что в отличие от детерминированного процесса продуцирования гелия в горных породах изменение концентрации гелия в подземных водах является случайным процессом, зависящим от множества факторов. Одним из этих факторов является процесс подготовки и реализации очага землетрясения. Построение модели, позволяющей количественно



выразить эту взаимосвязь является, важной народнохозяйственной задачей.

Разработка энергетической модели подготовки и реализации очага землетрясения

В общем случае, помимо рифтогенеза, сейсмичность может быть вызвана такими основными формами деформации и взаимодействия литосферных плит, как трансформный разлом, субдукция (наполнение одной литосферной плиты на другую) и их различными вариациями. Несмотря на схожесть и общность подходов, нами будет рассмотрена только модель подготовки и реализации очага землетрясения на примере рифтогенеза.

По С. Л. Оптнеру, система состоит из набора объектов, имеющих определенные свойства, и набора связей между объектами и их свойствами. Система определяется заданием системных объектов, свойств и связей. Системные объекты – это вход, процесс, выход, обратная связь и ограничение [2]. Применительно к рассматриваемой проблеме система подготовки и реализации очага землетрясения включает в себя такие объекты, как вход, выход и систему литосферных плит и тектонических разломов (рис. 1).

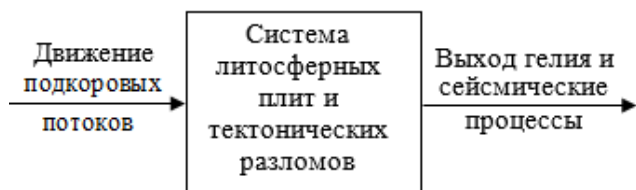


Рис. 1. Структура подготовки и реализации очага землетрясения

Входом системы является движение подкоровых потоков, вызывающее рифтогенез. Выходом системы являются сейсмические процессы и наблюдаемая концентрация гелия в подземных водах. Объект «обратная связь» в данной системе отсутствует. Объект «процесс» — это разрушение пластов горных пород в ходе рифтогенеза. Ограничения системы – это прежде всего прочность горных пород в зоне будущего гипоцентра землетрясения.

Для получения адекватной модели системы подготовки и реализации очага землетрясения наибольшую сложность и наибольшую практическую важность представляет собой моделирование такого объекта системы как процесс разрушения горных пород.

Количественно горные породы характеризуются схожими показателями прочности и твердости. Соответствующие показатели прочности

и твердости горных пород коррелированы между собой.

Прочность – это свойство горных пород оказывать сопротивление внешним силам при растяжении или сжатии образцов. Параметры прочности образцов горных пород принято измерять на специальных растягивающих или сжимающих лабораторных установках. Методика определения прочности горных пород при растяжении на разрыв используется и при моделировании землетрясений. Моделирование показало, что растяжение горных пород в процессе подготовки и реализации очага землетрясения проходит три стадии, обозначенные, например, в [5] как стадии I–III:

I. Начало растяжения и активизация разрыва.

II. Укрупнение трещин и локализация их в области будущего макроразрыва.

III. Формирование магистрального разрыва.

При моделировании подготовки и реализации очага землетрясения образцы горных пород, как правило, имеют размеры менее метра. Из-за хрупкости и малого размера образцов очень трудно оценить их линейное растяжение. Поэтому стадии разрушения горных пород при моделировании подготовки и реализации очага землетрясения принято показывать не в виде функции линейного растяжения, а в виде функции от времени. Далее мы будем называть подобное моделирование «микромоделированием подготовки и реализации очага землетрясения» или, для краткости, просто «микромоделированием».

Твердость – это свойство горных пород оказывать сопротивление к внедрению в них инородного тела. Измерение твердости горных пород осуществляется на специальных лабораторных установках путем вдавливания в образец твердосплавного пуансона. Показатели твердости необходимо знать при проектировании буровых установок, проведении взрывных работ и т. п.

При измерении твердости горных пород было установлено, что для разрушения образца к нему нужно приложить некую силу, которая в процессе деформации образца до разрушения выполнит общую работу A_p . Общая работа по разрушению образца A_p является суммой двух работ:

$$A_p = A_{упр} + A_{пл}, \quad (1)$$

где $A_{упр}$ – работа упругих деформаций при разрушении образца; $A_{пл}$ – работа по пластической деформации образца перед разрушением.

При выполнении работы $A_{упр}$ она, по аналогии со сжимаемой пружиной, преобразуется

в упругую механическую энергию $E_{упр}$ образца. После разрушения образца накопленная им упругая энергия $E_{упр}$ преобразуется в другие виды энергии и выделяется в окружающую среду. То же самое происходит и при подготовке и реализации очага землетрясения. После формирования магистрального разрыва на III стадии подготовки и реализации очага землетрясения упругая энергия горных пород в зоне гипоцентра землетрясения $E_{упр}$ высвобождается преимущественно в виде компрессионных (продольных) сейсмических P волн. При распространении первичные P -волны частично преобразуются во вторичные (поперечные) S -волны. Эти волны P и S вызывают колебания земли и воспринимаются нами как толчки землетрясения.

Из (1) очевидно, что не вся энергия подготовки и реализации очага землетрясения E_p будет преобразована в энергию P и S волн. Значительная часть этой энергии будет потрачена на пластическую деформацию пластов горных пород в зоне будущего землетрясения. При измерении твердости количественное влияние пластической деформации образцов на процесс их разрушения учитывают в виде коэффициента пластичности горных пород:

$$K_{пл} = \frac{A_p}{A_{упр}} = \frac{A_p}{A_p - A_{пл}}$$

Доля $A_{пл}$ в общей работе по разрушению образца достаточно велика. Так, например, по данным Л. А. Шрейнера [6], $K_{пл}$ для гранита составляет 1,4–1,9, для базальта – 4,2, а для джепилита – 10. С учетом коррелированности показателей твердости горных пород при измерении и прочности пластов горных пород в зоне гипоцентра землетрясения следует, что из общей энергии E_p , затраченной на подготовку и реализацию очага землетрясения, на образование сейсмической волны тратится не более 50–70 %.

В отличие от $E_{упр}$, выделение энергии $E_{пл}$ происходит не сразу в виде удара, а постепенно в процессе подготовки и реализации очага землетрясения. Именно выделение $E_{пл}$ является причиной возникновения всех предвестников землетрясения. Поэтому разрабатываемая модель подготовки и реализации очага землетрясения должна хотя бы качественно оценивать взаимное соотношение этих энергий и преобразование их в другие виды энергий. Следовательно, искомая модель системы, необходимая для прогноза землетрясений,

должна быть энергетической моделью подготовки и реализации очага землетрясения.

В общем случае механическая энергия E , например, сжатой пружины, определена выражением

$$E = F\Delta l,$$

где F – средняя сила воздействия на объект; Δl – линейная деформация объекта.

Микромоделирование не позволяет описать энергетические изменения в горных пластах потому, что при микромоделировании невозможно измерить величину Δl .

Измерение твердости горных пород также не может служить моделью подготовки и реализации очага землетрясения потому, что в ней задействован другой механизм разрушения.

С большой степенью приближения качественная энергетическая модель подготовки и реализации очага землетрясения может быть получена на примере испытания металлического стержня на разрыв, диаграмма которого показана на рис. 2 (например, [7–9]).

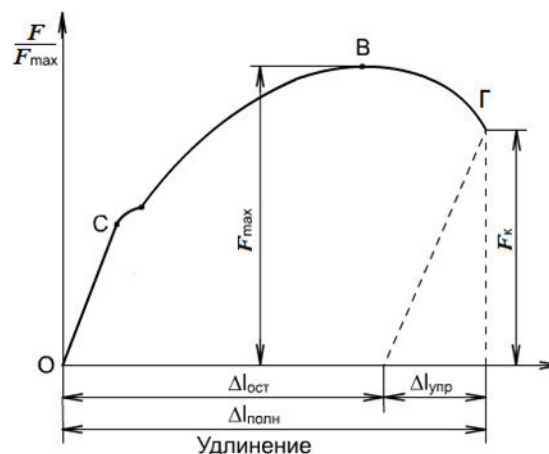


Рис. 2. Диаграмма испытания металлического стержня на разрыв

На рис. 2 обозначены:

$\Delta l_{полн}$ – полная длина стержня перед его разрывом;

$\Delta l_{упр}$ – упругое растяжение стержня при разрыве;

$\Delta l_{ост}$ – остаточная суммарная длина стержня после разрыва;

F_{max} – напряжение, соответствующее пределу прочности;

F_k – напряжение истинного сопротивления разрушению.

При разработке энергетической модели подготовки и реализации очага землетрясения, по аналогии с рис. 1, можно построить диаграмму



изменения давления горных пород вблизи от будущего гипоцентра землетрясения, исходя из того, что

$$F = PS,$$

где P – внутреннее давление системы под действием силы F ; S – площадь воздействия силы.

При моделировании также будет корректно предположить, что растяжение тектонического разлома происходит примерно с равной скоростью на протяжении многих лет. При таких предпосылках типовой процесс рифтогенеза можно представить в виде ряда повторяющихся циклов. Поскольку силу деформации горных пластов при рифтогенезе сложно измерить даже косвенно, изменение энергии в процессе подготовки и реализации очага землетрясения удобнее выразить через давление горных пород (рис. 3).

Точкой А на рис. 3 обозначено предыдущее землетрясение.

Интервал А–Б на рис. 3 соответствует I стадии подготовки и реализации очага землетрясения. На этой стадии происходит накопление механической энергии упругой деформации горных пород. Продолжительность этапа несколько столетий.

Участок Б–В на рис. 3 – II стадия подготовки и реализации очага землетрясения. На этой стадии давление в системе достигает величины P_{\max} и в дальнейшем изменяется незначительно. Сила рифтогенеза на этом этапе принимает максимальное значение F_{\max} . Для II стадии характерна пластичная деформация горных пород. Давление P_{\max} равно пределу текучести горных пород δ_T в зоне гипоцентра надвигающегося землетрясения. Продолжительность стадии – до нескольких лет.

Интервал В–Г на рис. 3 – это III стадия подготовки и реализации очага землетрясения – формирование магистрального разлома. Данная стадия характеризуется максимальным растяжением разлома на величину $\Delta l_{\text{полн}}$ и падением давления пластов горных пород от величины P_{\max} до P_K . Продолжительность стадии – 1–3 месяца.

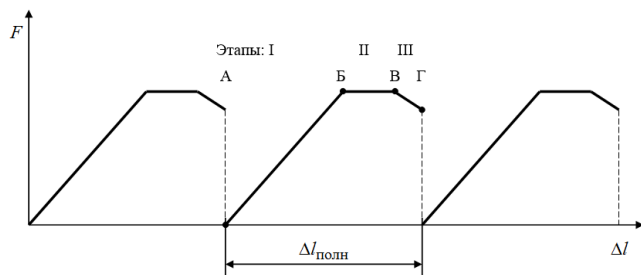


Рис. 3. Диаграмма 2-й стадии подготовки и реализации очага землетрясения

В точке Г происходит магистральный разрыв краев разлома на величину $\Delta l_{\text{упр}}$, выделяется

механическая энергия, накопленная в разломе, и происходит землетрясение.

Прогнозируемая сейсмичность и закономерности концентрации выделяемого при этом гелия по предлагаемой энергетической модели подготовки и реализации очага землетрясения хорошо согласуются с дилатантно-диффузионной моделью подготовки и реализации очага тектонического землетрясения [10] (рис. 4).

Решение проблемы оценки количественного влияния процесса подготовки и реализации очага землетрясения на концентрацию гелия в подземных водах

Главный вывод, который позволяет сделать энергетическая модель подготовки и реализации очага землетрясения, состоит в том, что на III стадии подготовки землетрясения давление горных пород вблизи от гипоцентра падает от P_{\max} до P_K . Это не противоречит результатам микромоделирования, однако на основании микромоделирования такой вывод не очевиден, поскольку при микромоделировании не соблюдается принцип пропорциональности моделирования (например, [11]).

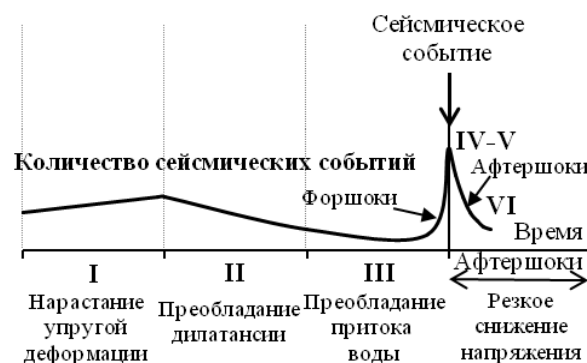


Рис. 4. Дилатантно-диффузионная модель подготовки и реализации очага тектонического землетрясения

Прямое измерение давления горных пород в области будущего гипоцентра довольно проблематично:

1. Расположение будущего гипоцентра землетрясения заранее неизвестно. Поэтому поиск координат точек для бурения скважин, позволяющих измерить давление горных пород, придётся выбирать вслепую.

2. Глубина залегания гипоцентров самых мелких землетрясений составляет первые километры. Бурение на такую глубину чрезвычайно дорого и технически сложно. Бурение на глубины более 12 км в настоящее время технически нереализуемо.

3. Измерения давления горных пород на глубинах выше гипоцентра могут дать неадек-



ватные показания по отношению к процессам, происходящим ниже точки измерения.

Косвенное измерение давления горных пород в зоне будущего гипоцентра возможно по концентрации гелия в подземных водах. Известно, что концентрация гелия в подземных водах очень чутко реагирует на изменение давления. Наблюдениями доказано, что на концентрацию гелия в подземных водах влияет даже барометрическое давление [1].

В качестве исходного постулата для решения проблемы оценки количественного влияния процесса подготовки и реализации очага землетрясения на концентрацию гелия в подземных водах был принят выявленный нами факт независимости случайных отклонений концентрации гелия в удаленных пунктах измерения. В отличие от влияния случайных факторов логично предположить, что падение давления горных пород в зоне будущего гипоцентра синхронно повлияет на выход гелия на достаточно обширных территориях. Поэтому в качестве метода косвенного измерения вариации давления горных пород в результате сейсмических процессов, используемого также для прогноза землетрясений [12], нами был предложен математический аппарат парных индикаторных функций:

$$I_{Л-З}(t_i) = \frac{1}{10\tilde{\sigma}_{H_{Л}}\tilde{\sigma}_{H_{З}}} \times \\ \times \sum_{j=-10}^0 (H_{Лi-j} - \tilde{m}_{H_{Л}})(H_{Зi-j} - \tilde{m}_{H_{З}}), \\ I_{Л-К}(t_i) = \frac{1}{10\tilde{\sigma}_{H_{Л}}\tilde{\sigma}_{H_{К}}} \times \\ \times \sum_{j=-10}^0 (H_{Лi-j} - \tilde{m}_{H_{Л}})(H_{Ки-j} - \tilde{m}_{H_{К}}), \\ I_{З-К}(t_i) = \frac{1}{10\tilde{\sigma}_{H_{З}}\tilde{\sigma}_{H_{К}}} \times \\ \times \sum_{j=-10}^0 (H_{Зi-j} - \tilde{m}_{H_{З}})(H_{Ки-j} - \tilde{m}_{H_{К}}),$$

где t_i – текущая дата ежесуточных измерений концентрации гелия в подземных водах; $H_{Лi}$, $H_{Зi}$ и $H_{Ки}$ – нормированные показания концентрации гелия в пунктах наблюдения Л, З и К соответственно; $\tilde{\sigma}_{H_{Л}}$, $\tilde{\sigma}_{H_{З}}$, $\tilde{\sigma}_{H_{К}}$, $\tilde{m}_{H_{Л}}$, $\tilde{m}_{H_{З}}$ и $\tilde{m}_{H_{К}}$ – СКО и среднее значение нормированных показаний концентрации гелия в подземных водах в соответствующем пункте наблюдения за весь период наблюдения с 2007 года по настоя-

щее время; для нормированных показаний концентрации гелия $\tilde{m}_{H_{Л}} = \tilde{m}_{H_{З}} = \tilde{m}_{H_{К}} = 1$.

Кроме парных индикаторных функций была предложена интегрированная индикаторная функция:

$$I(t_i) = \frac{1}{10} \sum_{j=-10}^0 \prod_{n=1}^N \left| \frac{H_n(t_i-j) - 1}{\tilde{\sigma}_n} \right|,$$

где n – число пунктов наблюдения гелия.

Индикаторные функции представляют собой разновидность цифрового фильтра с шириной «окна» в 11 измерений (11 дней).

Выполненные авторами исследования вариаций концентрации растворенного гелия в подземных водах Южного Прибайкалья с 2007 года по настоящее время показали, что они обусловлены только сейсмическими процессами и практически не зависят от других факторов. Эти исследования также показали, что в период возрастания сейсмической активности (например, в период, предшествующий Култукскому землетрясению 27.08.2008 с магнитудой $M = 6,3$) парные индикаторные функции образуют неповторяющиеся информационные структуры. Опытным путем было установлено, что для имеющегося в нашем распоряжении набора пунктов наблюдения наибольший практический интерес представляют функции $I_{Л-З}(t_j)$ и $I_{З-К}(t_j)$:

Функция $I_{Л-З}(t_j)$ реагирует прежде всего на изменение сейсмической обстановки в зоне Обручевского тектонического разлома, т. е. вблизи г. Иркутска.

Функция $I_{З-К}(t_j)$ реагирует не только на местные сейсмические явления, но и на удаленные на большие расстояния. Так, например, в г. Иркутске по изменениям показаний $I_{З-К}(t_j)$ наблюдались характерные предвестники Тувинских землетрясений в Красноярском крае, удаленных от Иркутска на 580–590 км. Хотя, конечно, в настоящее время преждевременно говорить о возможности прогноза столь удаленных землетрясений.

Функция $I(t_j)$ необходима для общего анализа.

Метод среднесрочного прогноза землетрясений на основе энергетической модели подготовки и реализации очага землетрясения

На рис. 5 представлены изменения индикаторных функций в период завершения II стадии подготовки и реализации Култукского землетрясения 27.08.2008 и полностью III стадия этого землетрясения.

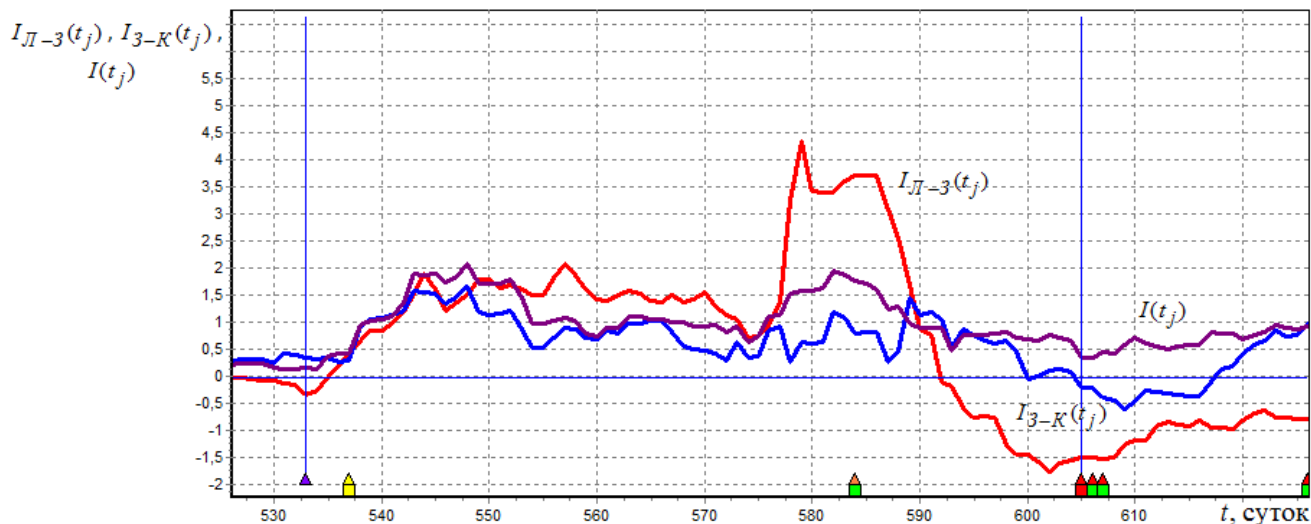


Рис. 5. Парные индикаторные функции и интегрированная индикаторная функция в период концентрации напряжений земной коры перед Култукским землетрясением. Вертикальными линиями обозначены начало и конец этого периода с 16.06.2008 (отметка 533) по 27.08.2008 (отметка 605). «Домиками» на шкале обозначены даты ближних и дальних сейсмических толчков и афтершококов

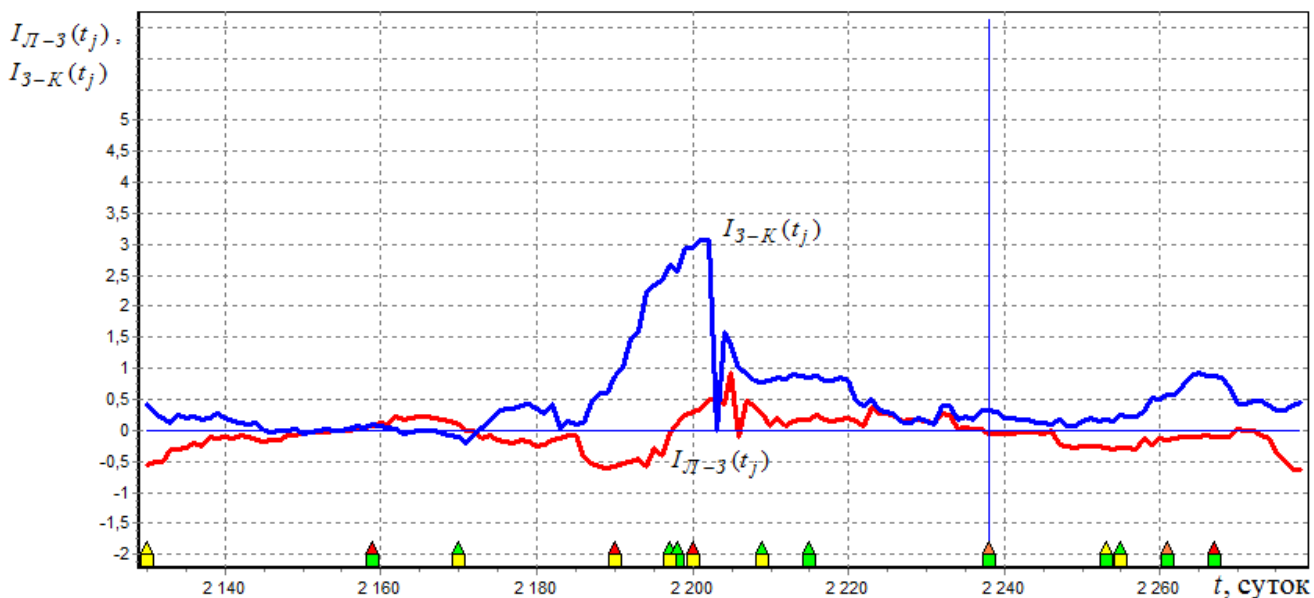


Рис. 6. Парные индикаторные функции в период концентрации напряжений земной коры перед землетрясением в Тункинской долине 15.02.2013 (отметка 2238); энергетический класс $K = 10,0$; расстояние до пункта наблюдения Зеленый Мыс $L = 170,2$ км

Култукское землетрясение разделило показания индикаторных функций, полученные за всё время наблюдения, на три периода:

1. Равновесное состояние системы континентальных плит и разломов до и после Култукского землетрясения.
2. Концентрации напряжений земной коры перед землетрясением.
3. Переход системы континентальных плит и разломов в равновесное состояние.

С точки зрения обеспечения достоверного среднесрочного прогноза землетрясений наибольший интерес представляет период концентрации

напряжений земной коры перед Култукским землетрясением (III стадия подготовки и реализации землетрясения). На рис. 5 границы этого периода обозначены вертикальными линиями, его продолжительность 72 дня. Полученную информационную структуру подготовки землетрясения (рис. 5) невозможно ни с чем спутать даже неспециалисту. Ничего подобного не было за весь период наблюдения с 2007 года по настоящее время.

Период перехода системы континентальных плит и разломов в равновесное состояние начался сразу после землетрясения 27.08.2008 и продолжался до 05.11.2009. Его длительность составила



435 суток. Для этого периода характерны непрерывные знакопеременные колебания индикаторных функций с периодом от 2 до 8 недель.

В равновесном состоянии системы континентальных плит и разломов индикаторные функции колеблются с малыми амплитудами около своего нулевого значения. Периодически в районе слабых сейсмических толчков возникают характерные информационные структуры, подобные показанной на рис. 6.

Выводы

Достоверный прогноз землетрясения должен ответить на три вопроса:

1. Когда оно произойдет?

2. Какова будет магнитуда предполагаемого землетрясения?

3. Где будет его эпицентр?

На примере Култукского землетрясения нами было установлено, что магнитуда прогнозируемого землетрясения определяется продолжительностью периода концентрации напряжений земной коры перед землетрясением, т. е. продолжительностью III стадии. Признаком III стадии надвигающегося землетрясения является не меняющее своего знака устойчивое превышение нормальных показаний индикаторных функций (см. рис. 5). На основании выполненных исследований можно утверждать, что если такие аномальные показания наблюдаются более двух месяцев подряд, то в ближайшее время в Южном Прибайкалье следует ожидать мощного землетрясения. При этом чем больше длится период ожидания, тем больше будет его магнитуда.

Расстояние от центра наблюдений в пункте Зелёный Мыс до эпицентра будущего землетрясения можно ориентировочно оценить по соотношению парных индикаторных функций $I_{Л-З}(t_j)$ и $I_{З-К}(t_j)$.

Эпицентры землетрясений вблизи г. Иркутска расположены преимущественно по линии Тункинская долина – северное побережье Байкала. Поэтому если расстояние до будущего эпицентра оценено, то можно ориентировочно предположить и его местоположение.

Таким образом, предлагаемая энергетическая модель подготовки и реализации очага землетрясения позволила решить проблему оценки количественного влияния сейсмических процессов

на концентрацию гелия в подземных водах и разработать метод достоверного среднесрочного прогноза землетрясений [12] на её основе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барсуков В.Л., Беляев А.А., Серебренников В.С. Вестники беды (о поиске средств геохимического прогноза землетрясений). М. : Наука. 1989. 136 с.
2. Оптнер С. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. М. : Советское радио, 1969. 216 с.
3. Логачев Н.А., Борняков С.А., Шерман С.И. О механизме формирования Байкальской рифтовой зоны по результатам физического моделирования // ДАН. 2000. Т. 373. № 3. С. 388–390.
4. Гелий [Электронный ресурс] // Наука и Техника. Популярная библиотека химических элементов. М. : Наука, 2002. URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1177210/pb002.htm>. (дата обращения 22.04.2017).
5. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М. : Наука, 1993. 313 с.
6. Горная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mining-enc.ru/p/prochnost>. (дата обращения 22.04.2017).
7. Аркуша А.И. Техническая механика. Теоретическая механика и сопротивление материалов. М. : Высшая школа, 2008. 263 с.
8. Заславский Б.В. Краткий курс сопротивления материалов. М. : Машиностроение, 1986. 328 с.
9. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. М. : Оборонгиз, 1952. 555 с.
10. Scholz C. H., Sykes L. R., Aggarwal Y. P. Earthquake prediction: a physical basis. // Science. 1973. Vol. 181. Pp. 803–810.
11. Чхайдзе Н. Методы подобия и математического моделирования в исследовании сложных систем. Тбилиси : Технический университет, 2009. 99 с.
12. Патент № 2601403 Рос. Федерация. Способ гидрогеохимического определения времени возникновения землетрясений в Южном Прибайкалье / Р.М. Семенов, В.В. Кашковский, М.Н. Лопатин. № 2015110671 ; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 31.



УДК 004.942

Ханусов Владимир Георгиевич,

д. т. н., профессор кафедры автоматизации производственных процессов,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
тел. 8(914)888-30-81, e-mail: hanusov@yandex.ru

Ермаков Андрей Андреевич,

аспирант кафедры автоматизации производственных процессов,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
тел. 8(904)158-82-69, e-mail: ermakov.istu@gmail.com

ДИНАМИЧЕСКИЕ СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ КОТЛОАГРЕГАТОМ ПО КАНАЛУ «РАСХОД ТОПЛИВА – РАЗРЕЖЕНИЕ В ТОПКЕ» В ПРОИЗВОДСТВЕ ПАРА

V. G. Hanusov, A. A. Ermakov

DYNAMIC STOCHASTIC MODELS OF THE PACKAGE BOILER CONTROL: «FUEL CONSUMPTION – UNDERPRESSURE IN FURNACE» IN SUPERHEATED STEAM PRODUCTION

Аннотация. Поиск и разработка полноценных высокоэффективных энергосистем, на сегодняшний день является центральной задачей научного сообщества. Данное исследование относится к усовершенствованию методов прогноза и адаптивного управления процессом горения в пылеугольных топках.

В статье рассматривается применение известной методики Д. Ж. Бокса и Г. Дженкинса для идентификации процесса производства пара.

В качестве объекта исследования выбрана топочная камера, которая представляет собой весьма сложную и взаимосвязанную систему. Она была описана как динамический стохастический объект с неконтролируемыми возмущающими воздействиями. Экспериментально-статистическими методами получена математическая модель, позволяющая определить степень влияния расхода топлива на разрежение с левой и правой сторон. Частота вращения питателей сырого угля (расход топлива) относится к управляющим воздействиям в процессе производства пара.

Разработанная модель может быть использована для прогноза и управления разрежением в топочном устройстве с левой и правой сторон.

Ключевые слова: топочное устройство, разрежение в топке, стохастическая модель, идентификация, оценивание, диагностическая проверка.

Abstract. The search and development of full-fledged highly efficient energy systems is today the central task of the scientific community. This research refers to the improvement of forecast methods and adaptive control of the combustion process in pulverized-coal furnaces.

The article deals with the use of the known Box-Jenkins technique for identifying steam generation process.

The object of study combustion chamber, which is a very complex and interconnected system. It was described as a dynamic stochastic object with uncontrolled disturbance. Experimental-statistical methods, were used to get the mathematical model allowing to determine the fuel consumption impact on the vacuum on the left and right sides. Raw coal feeders rotational speed (fuel consumption) refers to the control actions in the process of steam generation.

The developed model can be used for the prediction and management of underpressure in the combustion unit on the left and right sides.

Keywords: furnace chamber, underpressure in furnace, stochastic model, identification, estimation, diagnostic check.

Введение

В качестве объекта исследования рассматривается пылеугольная топка, в которую подается подогретая угольная пыль и воздух. Косвенным параметром, характеризующим тепловыделение сгораемой пыли воздушной смеси, может служить разрежение в топочной камере [1]. Непрерывные данные были собраны для получения информации о динамике системы в интересном для практики диапазоне. В ходе исследования полученные параметры будут рассматриваться как непрерывные случайные входные/выходные ряды.

Повышенное разрежение за котлом приводит к понижению КПД котла и повышенным энергетическим затратам (на питание дымососов), повышению температуры уходящих газов [2]. Пониженное разрежение приводит к отсутствию тяги,

выбросу дымовых газов в помещение котельной [3].

Топочная камера как объект управления представляет собой весьма сложную и взаимосвязанную систему. Ее можно характеризовать как динамический стохастический объект с неизменяемыми возмущающими воздействиями [4].

В качестве объекта исследования был выбран котельный агрегат БКЗ-420-140-6, оборудованный четырьмя пылеприготовительными установками.

Для стабилизации температурного режима в топке требуется изучить степень влияния частоты вращения питателей сырого угля (ПСУ) на разрежение уходящих газов в топочной камере. Изменение частоты вращения ПСУ может относиться как и к управляющим, так и возмущающим воздействиям, в зависимости от требований системы