



16. Построение оптимальных алгоритмов поиска неисправностей в технических объектах / Д. В. Ефанов. СПб. : Изд-во ПГУПС, 2014. 49 с.
17. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М. : Наука, 1965. 460 с.
18. Аржененко А.Ю. Чугаев Б.Н. Оптимальные бинарные вопросники. М. : Энергоатомиздат, 1989. 128 с.
19. Пархоменко П.П. Теория вопросников // Автоматика и телемеханика. 1970. № 4. С. 140–159.

УДК 669.71:502.3

Кондратьев Виктор Викторович,

к. т. н., руководитель инновационно-технологического центра ФТИ,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
тел. 8(902)568-77-02, e-mail: kvv@istu.edu

Иванов Николай Аркадьевич,

к. ф-м. н., директор ФТИ,
Иркутский национальный исследовательский технический университет
тел. 8(3952) 40-59-03, e-mail: ivnik@istu.edu

Карлина Антонина Игоревна,

ведущий научный сотрудник инновационно-технологического центра ФТИ,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
тел. 8(950)120-19-50, e-mail: karlinat@mail.ru

Каргапольцев Сергей Константинович,

д. т. н., профессор,
Иркутский государственный университет путей сообщения,
тел. 8(3952)63-83-04, e-mail: kck@irgups.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ СИСТЕМ ГАЗООЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

V. V. Kondratiev, N. A. Ivanov, A. I. Karlina, S. K. Kargapoltsev

TECHNOLOGICAL PROCESSES GAS CLEANING SYSTEMS OF PARAMETERS EXPERIMENTAL RESEARCH

Аннотация. В статье проведен анализ схем цепей аппаратов и технологий для подготовки газов к очистке. Отходящие печные газы содержат оксиды серы, удаление которых возможно промывкой содовыми растворами, что приводит к необходимости применения двухступенчатой очистки. Газы, содержащие только пыль, могут очищаться по упрощенным схемам, включающим только аппараты предварительной очистки и рукавные фильтры. Приведены принципиальные схемы и аппараты различных линий газоочистки, используемые в отечественной практике, исследованы преимущества и недостатки каждой из них. Получение сухих продуктов очистки газов (пыли) создает возможность дополнительного маневра по их реализации как товарного продукта. Упрощаются операции уплотнения, перегрузки и расфасовки пыли в контейнеры или крафт-мешки для транспортировки и продажи потребителю. Отмечено, что промышленное использование сухих схем газоочистки возможно только при отсутствии в газах оксидов серы. В противном случае после электрофильтров или рукавных фильтров необходима дополнительная система орошения газов содовыми растворами в скруббере.

Ключевые слова: производство кремния, сухая газоочистка, мокрая газоочистка, аппараты для подготовки газов к очистке, углеродные нанотрубки.

Abstract. The article the analyses of circuits devices and technologies to prepare gas to be purged. Furnace exhaust gases contain oxides of sulfur that can be removed by washing with alkaline solutions, which leads to two-stage cleaning. Gases containing dust can be cleaned using simplified schemes that includes only pre-cleaning devices and bag filters. The schematics of the circuits and devices of the different lines of gas purification used in domestic practice are shown, the advantages and disadvantages of each of them are investigated. Obtaining dry products of gas cleaning (dust) creates the possibility of additional maneuver of their sales as a commercial product. Operations of dust sealing, overloading and packing in containers or kraft bags for transport and saling to the consumer simplified. It is noted that industrial use of dry gas cleaning schemes is possible only in the absence of sulphur oxides are in gases. Otherwise, after the electrostatic precipitators or bag filters additional irrigation gases in the scrubberis required using soda solution.

Keywords: silicon production, dry gas cleaning, wet gas cleaning, apparatus for preparing gas cleaning, carbon nanotubes.

Очистка газов, образующихся в процессе электроплавки кремния в настоящее время, производится в соответствии с требованиями санитарных норм и сводится к выделению твердых пылевидных частиц и серы в виде газообразных оксидов [1].

Методы улавливания пылевой фазы

Зависимость эффективности пылеулавливания от крупности пыли представлена в табл. 1.

Отходящие печные газы содержат оксиды серы, удаление которых возможно промывкой содовыми растворами, что приводит к необходимости применения двухступенчатой очистки со зна-



чительным усложнением схемы цепи аппаратов и технологии очистки [2, 3].

Т а б л и ц а 1

Эффективность пылеулавливания по фракциям

Фракция пыли, мкм	Массовая доля, %	Эффективность пылеулавливания, %
<1	78	80
1–3	10	80–92
3–10	5	92–99,9
>10	7	99

Перечисленные особенности очистки газов печей для выплавки кремния определили использование методов очистки или их сочетание, что зависит от состава реакционных газов.

Газы, содержащие пыль и оксиды серы, очищаются по многоступенчатым схемам в сле-

дующей последовательности: аппараты предварительной очистки, аппараты мокрой очистки первой и второй ступеней [1, 4–6].

Газы, содержащие только пыль, могут очищаться по упрощенным схемам, включающим только аппараты предварительной очистки и рукавные фильтры.

Вместо рукавных тканевых фильтров могут использоваться электрофильтры с предварительной подготовкой газа в скруббере (увлажнение). Назначение аппаратов предварительной очистки заключается в отделении 5–20 % крупной, тяжелой, раскаленной пыли, кусочков горящего угля, которые мешают тонкой очистке, прожигают ткань фильтров, повышают абразивный износ аппаратуры, особенно вентиляторов.

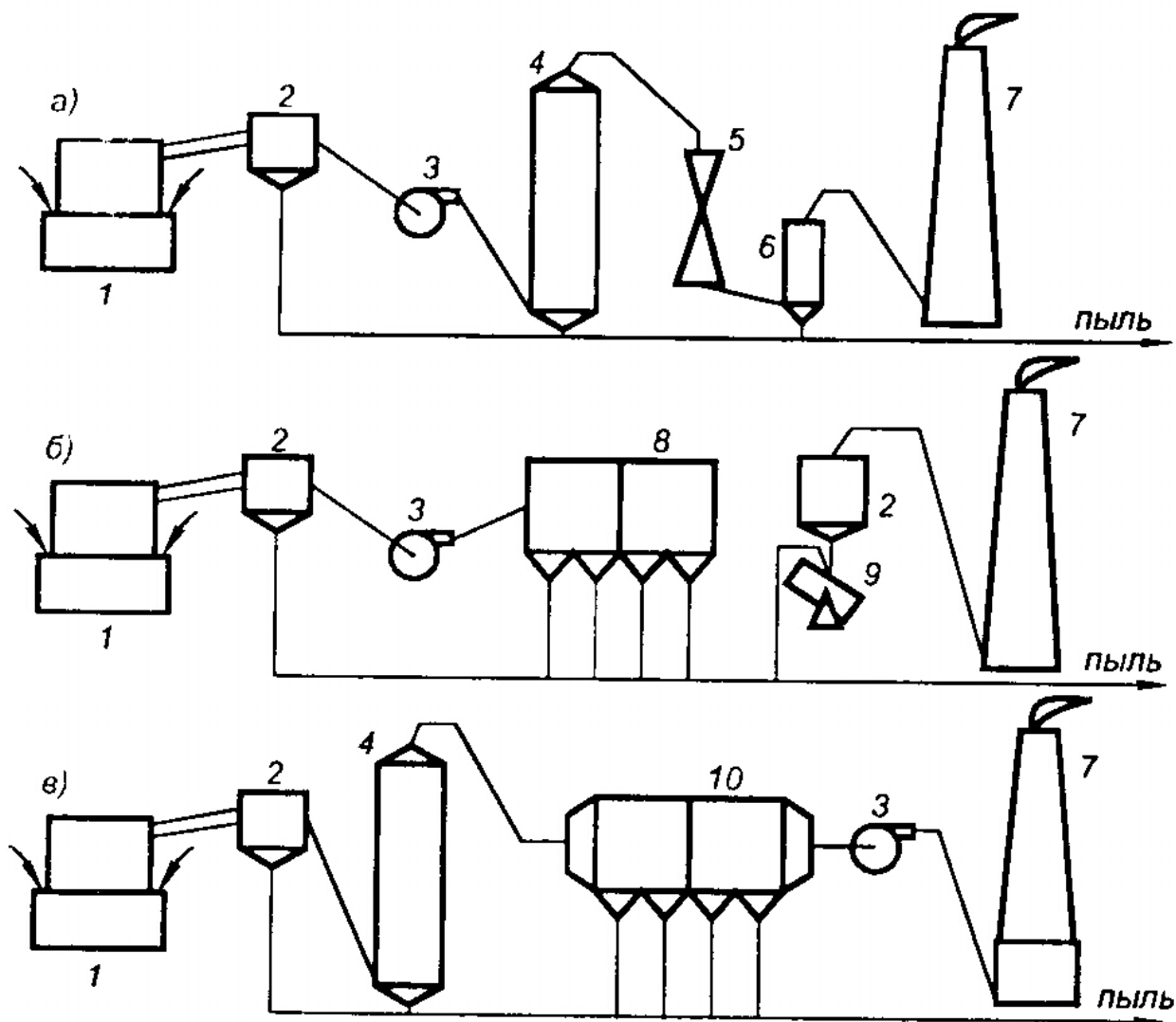


Рис. 1. Принципиальные схемы и аппараты различных линий газоочистки:

а) мокрая; б) сухая; в) смешанная;

1 – электропечь; 2 – циклон; 3 – дымосос; 4 – скруббер;

5 – труба Вентури; 6 – циклон-каплеуловитель; 7 – дымовая труба;

8 – рукавный фильтр; 9 – гранулятор; 10 – электрофильтр

Назначение аппаратов мокрой очистки заключается в улавливании соединений серы и части тонкодисперсной пыли. Эти же функции выполняют тканевые рукавные фильтры и электрофильтры.

На рис. 1 показаны принципиальные схемы и аппараты различных линий газоочистки, используемые в отечественной практике.

После смешения с воздухом и охлаждения от 500 °С до 250 °С отходящие газы поступают в циклон для подготовки к очистке, где отделяется грубая пыль. Далее системой, состоящей из двух мощных дымососов, газы прокачиваются через две ступени очистки: скруббер (1-я ступень); батарея из четырех труб Вентури (2-я ступень).

После прохождения циклона-каплеуловителя газы через дымовую трубу выбрасываются и рассеиваются в атмосфере [1, 6–7].

Преимуществом метода является комплексность очистки – одновременное удаление содовыми растворами пыли и серы. В сухом виде выделяется до 20 % крупной и тяжелой пыли, содержащей углерод, диоксид и карбид кремния. Пыль в виде брикетов или гранул может возвращаться в плавку.

Недостаток метода – большое гидравлическое сопротивление цепи аппаратов, что требует установки двух мощных энергоемких дымососов, работающих в крайне тяжелых условиях.

В результате на практике имеют место их частые выходы из строя, что снижает эффективность газоочистки в целом.

На основании результатов исследований выявлено, что пыль технологических газов кремниевых производств содержит большое количество наноструктур, которые имеют высокие показатели по самоагломерации. Практически весь углерод представлен углеродными нанотрубками (рис. 2), а диоксид кремния – нанопыльками (рис. 3).

Постараемся объяснить образование УНТ в пыли отходящих газов. Дуга в производстве кремния – способ получения высоких температур. В дуге переменного тока, как уже было сказано выше, происходят два процесса: процесс ионизации и процесс деионизации. В моменты деионизации углерод находится в молекулярном газовом состоянии и хаотично движется в газовой полости. По мере удаления от канала дуги температура падает, и при достижении 3973 К идет процесс десублимации – газовая фаза переходит в твердую, а при 2973 К могут образовываться углеродные нанотрубки (УНТ). Этот процесс эндотермический.

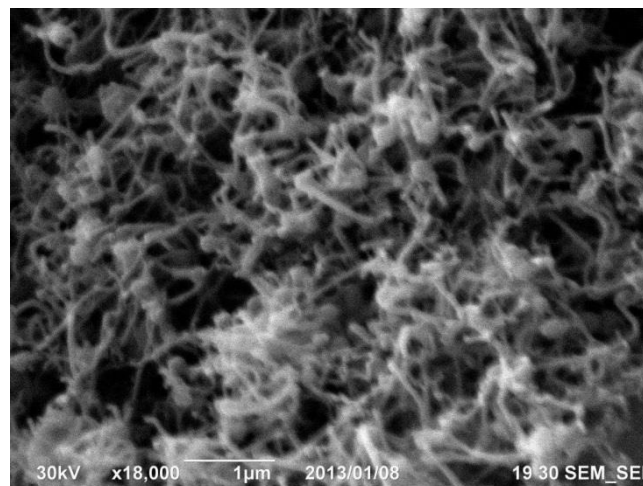


Рис. 2. Углеродные нанотрубки

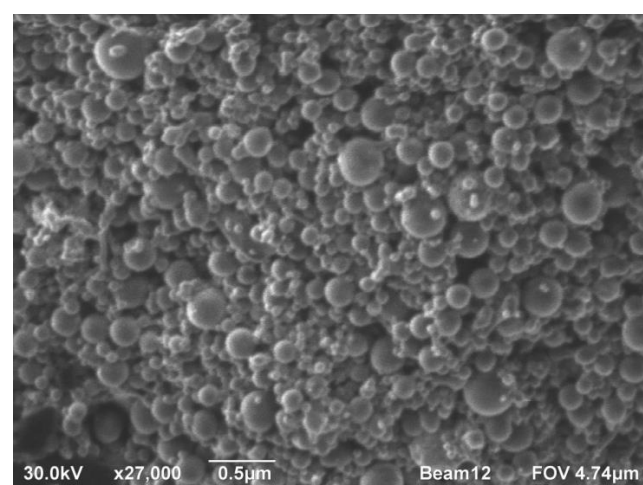
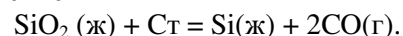


Рис. 3. Нанопыльки кремнезема

В нашем представлении эту роль (охлаждение фрагментов, унос энергии) играет использование в процессе получения кремния переменного тока. При смене полярности электрода несколько снижается температура. А агрегация фрагментов легко может происходить в газовой полости. При этих температурах могут находиться частицы твердого углерода из восстановителя, либо твердые частицы карбида кремния, либо капельки жидкого кремния, которые могут играть роль центров кристаллизации, на которых могут формироваться наноструктуры.

При электротермическом получении кремния может реализоваться и другой механизм образования УНТ – процесс каталитического разложения газообразных углеводородов, которые получают при пиролизе восстановителей.

Процесс карботермического восстановления кремния обычно описывают обобщенным балансовым уравнением



При производстве кремния используются следующие восстановители: древесный уголь,



нефтяной кокс, каменный и бурый уголь. При нагревании восстановителей происходит их пиролиз. В продуктах пиролиза содержатся летучие, жидкие и твердые вещества: H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_4 , H_2S , NH_3 , H_2O , бензол, $(NH_4)_2SO_4$, каменноугольная смола, остаток — кокс или полукокс. При разложении газа при $1100\text{ }^\circ\text{C}$ образуются свободные атомы углерода, конденсирующиеся затем на более холодной подложке, на которой и могут образовываться наноструктуры. Этот процесс каталитический. Катализатором могут выступать металлы подгруппы железа, которые содержатся в электродах и руде. В угольных электродах содержится более 1 % окисленных металлов Fe, Al, Co, Ti [8–9].

Таким образом, при карботермическом получении металлического кремния могут реализовываться два механизма образования углеродных нанотрубок: модифицированный дуговой метод и каталитическое разложение газообразных углеводородов в присутствии катализаторов.

С учетом необходимости утилизировать высокоценные продукты (углеродные наноструктуры и мелкодисперсный диоксид кремния) из отходов производства кремния, схемы газоочистки должны предусматривать возможность отбора нанопродуктов.

Схема цепи аппаратов сухой газоочистки в отличие от мокрой, предусматривающей дальнейшее флотационное обогащение наноразмерных сред [10–13], включает рукавные фильтры или электрофильтры, что позволит получать сухой продукт без необходимости операций сушки. Причем рукавные фильтры при наличии механизма самоагломерации наиболее предпочтительны.

Преимуществом сухих схем следует считать некоторое упрощение аппаратного обеспечения за счет отсутствия разветвленного хозяйства по приготовлению, хранению, перекачке, очистке и осветлению огромного количества оборотных содовых водных растворов, пульп, сливов и т. п.

Большим преимуществом электрофильтров является низкое гидравлическое сопротивление цепи аппаратов, снижение мощности и энергоемкости дымососов, вентиляторов и, в конечном счете, экономия электроэнергии.

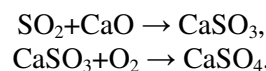
Получение сухих продуктов очистки газов (пыли) создает возможность дополнительного маневра по их реализации как товарного продукта, поскольку упрощаются операции уплотнения, перегрузки и расфасовки пыли в контейнеры или крафт-мешки для транспортировки и продажи потребителю [8, 14–15].

При анализе отходящих газов в пыли с помощью электронной микроскопии были обнару-

жены в достаточно большом количестве УНТ и нанопартикли кремнезема.

Газоочистные установки с рукавными фильтрами характеризуются повышенным сроком эксплуатации – 5–7 лет без замены фильтрующих элементов и высокой степенью очистки газа.

Между тем промышленное использование сухих схем газоочистки возможно только при отсутствии в газах оксидов серы. В противном случае после электрофильтров или рукавных фильтров необходима дополнительная система орошения газов содовыми растворами в скруббере [16–18] либо новая инновационная технология связывания диоксида серы кальциевыми соединениями. Данная реакция происходит согласно следующему механизму:



Осуществление реакции возможно организованным впрыском тонкодисперсного оксида кальция в поток газа перед рукавными фильтрами. Далее пуль подвергается сухой сепарации, которая позволит разделить углеродные наночастицы, нанопартикли оксида кремния и частицы гипса на основании различной гидравлической крупности частиц.

В свою очередь, высокая чувствительность процессов тканевой и особенно электрической фильтрации ко всякого рода отклонениям от оптимальных режимов работы требует проведения исследований для различных режимов функционирования систем газоочистки, а также высокой технологической культуры, достаточного уровня механизации и автоматизации.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ с использованием результатов работ, выполненных в ходе проекта 02.G25.31.0174 «Разработка комплексной ресурсосберегающей технологии и организация высокотехнологичного производства наноструктур на основе углерода и диоксида кремния для улучшения свойств строительных и конструкционных материалов» в рамках Программы реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Производство кремния. Справочник металлурга / К.С. Ёлкин и др. СПб. : Изд-во МАНЭБ. 2013. 364 с.
2. Кондратьев В.В., Николаев В.Н. Технологические решения по энергосбережению и снижению капиталоемкости систем газоудаления и



- газоочистки металлургических производств // *Металлург.* 2014. № 5. С. 96.
3. Новые технологические решения по переработке отходов кремниевого и алюминиевого производств / В.В. Кондратьев и др. // *Металлург.* 2013. № 5. С. 92–95.
 4. Аппараты для подготовки газов к очистке / Ю.С. Егоров и др. // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона : VI Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2015.* С. 232–235.
 5. Электрическая очистка газов производства кремния / К.С. Ёлкин и др. *Транспортная инфраструктура Сибирского региона : VI Междунар. науч.-практ. конф., Иркутск, 2015.* С. 226–231.
 6. Нарушения технологического режима плавки кремния и их последствия / А.И. Карлина и др. *Транспортная инфраструктура Сибирского региона : VI Междунар. науч.-практ. конф., Иркутск, 2015.* С. 236–243.
 7. Ёлкин К. С. Совершенствование восстановительной плавки кремния // *Научно-технический прогресс и повышение качества при производстве кремния : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. Иркутск, 1991.* С. 2–3.
 8. Перспективы применения нанотехнологий и наноматериалов в горно-металлургической промышленности / В.В. Кондратьев и др. // *Вестник Иркут. гос. техн. ун-та.* 2010. № 1. С. 168–174.
 9. Влияние железа и кремния на свойства алюминиевых сплавов / И.С. Ункуев и др. // *Перспективы развития технологии переработки углеводородных, растительных и минеральных ресурсов : материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. Иркутск, 2014.* С. 40–41.
 10. Дружинина Т.Я., Немаров А.А., Небогин С.А. Основные типы конструкций отсадочных машин // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2016. № 3 (51). С. 88–92.
 11. Немаров А.А., Лебедев Н.В., Карлина Ю.И. Теоретические и экспериментальные исследования параметров пневмогидравлических азэраторов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2015. № 4 (48). С. 44–50.
 12. Немаров А.А., Лебедев Н.В. Разработка научных основ повышения производительности флотационных машин и оценка их экономической эффективности // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2015. № 3 (47). С. 79–82.
 13. Турбулентность потоков в гидроциклоне / В.В. Коростовенко и др. // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона.* 2015. Т. 1. С. 254–258.
 14. Экспериментальное изучение зависимости температуры плавления кремнезема от удельной поверхности кристаллической фазы SiO₂ / К.С. Ёлкин и др. // *Наука, техника, инновации : II Междунар. науч.-техн. конф. Брянск, 2015.* С. 263–269.
 15. Углеродные нанотрубки в производстве металлического кремния / К.С. Ёлкин и др. // *Цветные металлы и минералы-2015.* Красноярск, 2015. С. 224–225.
 16. Кондратьев В.В. Временная технологическая инструкция ВТИ 10-2013 «Процесс флотационной переработки пылевидных тонкодисперсных отходов кремниевого производства» // *Карботермическая технология получения кремния для солнечной энергетики : ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.* Иркутск, 2013.
 17. Кондратьев В.В. Технологический регламент на выполнение проектных работ по обоснованию инвестиций и технико-экономическому обоснованию «Строительство участка флотационной переработки пылевидных тонкодисперсных отходов кремниевого производства в опытно-промышленном масштабе» // *Карботермическая технология получения кремния для солнечной энергетики : ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.* Иркутск, 2013.
 18. Ржечицкий Э.П., Иванов Н.Н., Иванчик Н.Н. Методы исследования аэродинамических параметров и эффективности «сухой» газоочистки // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2016. № 1 (49). С. 68–75.



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