

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ НАЗЕМНОГО РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА
В ОКРЕСТНОСТЯХ АЭС «ФУКУСИМА – 1»*****В. Ф. Раныта*****NUMERICAL ANALYSIS OF THE DATA OF SURFACE RADIATION MONITORING
IN THE VICINITY OF THE NUCLEAR POWER STATION «FUKUSHIMA-1»*****V. F. Raputa***

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4.4.

Предложена модель реконструкции полей выпадений по оси следа полидисперсной примеси от мгновенного источника. Для описания процесса переноса аэрозолей в атмосфере использовано полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии. Фракционный состав примеси в источнике по скоростям оседания задаётся с помощью двойного гамма-распределения. Проведена апробация разработанной модели реконструкции на данных наземного мониторинга аварийного загрязнения окрестностей атомной станции «Фукусима – 1».

A model of reconstruction of fields of losses of a polydisperse impurity from an instant source on a trace axis is proposed. For the description of process of carrying over of aerosols in atmosphere the semiempirical equation of turbulent diffusion is used. The fractional structure of an impurity in a source on speeds of subsidence is set by means of double gamma distribution. Approbation of the model of reconstruction on the data of monitoring of emergency pollution of vicinities of radiochemical factory the nuclear power station «Fukushima-1» is spent.

Ключевые слова: численное моделирование, аэрозоль, атомная станция, радиоактивное загрязнение, реконструкция, обратная задача.

Keywords: Numerical simulation, aerosol, nuclear power station, radioactive pollution, reconstruction, inverse problem.

Введение

Проблема определения количественных характеристик радиоактивного загрязнения природных сред в результате аварий на атомных станциях и предприятиях ядерно-технологического цикла является весьма актуальной. Применение методов прямого моделирования переноса загрязняющих примесей в принципе даёт возможность вполне корректного описания полей концентраций, но в данном случае этот подход сталкивается со значительными затруднениями обеспечения моделей соответствующей входной информацией. К ним следует отнести: неопределённости высоты и мощности источника выброса радионуклидов в атмосферу, распределение в начальном облаке аэрозольных частиц по размерам и скоростям оседания, определение текущих метеорологических условий и т. д. Сложным является вопрос о радионуклидном составе выброшенных смесей. В связи с этим возникает насущная необходимость использования при численном моделировании дополнительной экспериментальной информации о полях загрязнения и создания соответствующих моделей реконструкции [1, с. 5 – 18; 2, с. 102 – 108; 3, с. 10 – 16; 4, с. 5 – 8; 5; 6, с. 3 – 48].

Следует отметить, что при использовании постановок обратных задач нежелательно слишком детальное описание процессов переноса радионуклидов, поскольку это может привести к большим трудностям их обоснования и численной реализации. Необходимым этапом решения этих задач является анализ информативности используемой экспериментальной информации, планирования и оптимизации систем мониторинга [7; 8, с. 1053 – 1059].

1. Модель реконструкции атмосферных выпадений полидисперсной примеси

Предварительный анализ полученных экспериментальных данных наблюдений аэрозольных выпадений радионуклидов показывает, что изменение их концентраций по мере удаления от места аварийного выброса может быть весьма значительным. Это позволяет сделать предположение о присутствии в их составе как крупных, так и достаточно мелких аэрозольных фракций. Для априорного описания распределения вещества примеси по скоростям оседания w в атмосфере воспользуемся следующей двухпараметрической функцией [9, с. 78 – 87; 10, с. 86 – 88]:

$$N(w) = \frac{a^{m+1}}{\Gamma(m+1)} w^m e^{-aw},$$

$$m \geq -1, \quad a = \frac{m}{w_m},$$
(1)

где параметр w_m характеризует скорость преобладающей по количеству частиц фракции примеси, m – степень однородности распределения частиц примеси по скоростям w , $\Gamma(m)$ – гамма-функция Эйлера.

Исходным моментом для расчета поля выпадений полидисперсной примеси от точечного источника является соотношение [9, с. 78 – 87]:

$$p = \int_0^\infty w q_w N(w) dw,$$
(2)

где q_w – поле концентрации монодисперсной примеси со скоростью оседания w .

При расчете средней концентрации в приземном слое атмосферы определяющее значение имеют часто встречающиеся метеорологические условия. К ним относятся так называемые нормальные метеоусловия, для которых используется степенная аппроксимация скорости ветра и коэффициента вертикального турбулентного обмена [11]:

$$u(z) = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n, \quad K_z = k_1 \frac{z}{z_1},$$
(3)

где u_1 и k_1 – значения u и K_z при $z = z_1$.

С использованием соотношений (3) и аналитических решений уравнения турбулентной диффузии для относительно невысоких источников поле концентрации q_w вблизи земли можно представить в виде [9]:

$$q_w(x, y) = \frac{M c^\omega}{2(1+n) \sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+\omega) x^{1.5+\omega}} \exp$$

$$\exp \left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x} \right).$$
(4)

Здесь ось x ориентирована в направлении ветра, ось y направлена в поперечном ветру направлении, M – мощность источника примеси, k_0 – параметр турбулентного обмена в направлении оси y ,

$$c = \frac{u_1 H^{1+n}}{(1+n)^2 k_1}, \quad \omega = \frac{w}{k_1 (1+n)}.$$
(5)

С учётом соотношений (1), (4) выражение (2) можно представить в виде:

$$p(x, y) = \frac{Ma^{m+1}}{2(1+n)\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right) \int_0^\infty \frac{w^{m+1} \exp(-aw)}{\Gamma(1+w)} \left(\frac{c}{x}\right)^\omega dw =$$

$$= \frac{Ma^{m+1} (1+n)^{m+1} k_1^{m+2}}{2\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right) \int_0^\infty \frac{\omega^{m+1} \exp(-ak_1(1+n)\omega)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x}\right)^\omega d\omega$$
(6)

В частности, для осевой концентрации ($y = 0$) соотношение (6) представляется в виде:

$$p_{ос}(x) = \frac{\theta_1}{x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x}\right) \int_0^\infty \frac{\omega^{\theta_2} \exp(-\theta_3 \omega)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x}\right)^\omega d\omega,$$

$$\theta_1 = \frac{Ma^{m+1} (1+n)^{m+1} k_1^{m+2}}{2\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}}, \quad \theta_2 = m+1, \quad \theta_3 = ak_1(1+n).$$
(7)

Исследование свойств функции (7) показывает, что она в интервале значений $x \in (0, \infty)$ достигает максимума в некоторой точке x_0 , монотонно возрастает при $x \in (0, x_0)$ и соответственно монотонно убывает в интервале значений $x \in (x_0, \infty)$ и стремится к нулю при $x \rightarrow 0$, $x \rightarrow \infty$. Оценка неизвестных параметров θ_1 , θ_2 , θ_3 , входящих в соотношение (7), проводится методом наименьших квадратов с использованием данных измерений уровней радиации в точках местности. Следует также отметить, что величина C соответствует величине расстояния, на котором достигается максимальная приземная концентрация лёгкой примеси [12].

Замечание 1. Параметры θ_2 , θ_3 зависят от характеристик дисперсного состава аэрозольной примеси и метеорологических условий. Данное обстоятельство позволяет существенно снизить количество опорных точек измерений при проведении повторного оценивания осевого загрязнения в другие моменты времени. В этом случае достаточно лишь провести переоценку параметра θ_1 , который согласно (7) пропорционален мощности источника и изменение которого будет происходить лишь вследствие радиоактивного распада выпавших нуклидов.

Замечание 2. Для описания распределения спектра размеров частиц в первоначальном облаке взрыва можно было бы использовать и логарифмически нормальное распределение, но учитывая его близость к гамма-распределению, было выбрано описание в виде соотношения (1). В данном случае использование (1) заметно упрощает получение представлений вида (7) для оценивания полей выпадений полидисперсных примесей.

2. Анализ данных наблюдений радиоактивного загрязнения почвенного покрова в региональных окрестностях АЭС «Фукусима – 1»

Мощное землетрясение 11 марта 2011 г. у берегов Японии обусловило отключение на АЭС «Фукусима – 1» централизованного электроснабжения, а последующее за ним катастрофическое цунами вывело из строя резервные дизель-генераторы, что не позволило в дальнейшем проводить эффективное охлаждения активных зон остановленных реакторов и в конечном итоге привело к серии мощных взрывов на станции с выбросом в атмосферу смеси радионуклидов, включающих радиоактивные изотопы йода, цезия. В частности, в направлении на северо-запад от АЭС (префектура Фукусима) образовался след выпадений с высоким уровнем радиоактивного загрязнения. Зафиксированы также значительные превышения содержания радионуклидов Cs-134, Cs-137, I-131 в прибрежных водах возле АЭС.

В префектуре Фукусима ежедневно производится автомобильная радиационная разведка района загрязнения за пределами 20-и километровой зоны вокруг АЭС. Данные этого мониторинга ежедневно появляются в открытом доступе на сайте Министерства образования, культуры, спорта, науки и технологии Японии (МEXT). В начальный период загрязнения (15 – 18 марта) максимальная мощность дозы в 30 км на северо-запад от АЭС составляла порядка 150 – 170 мкЗв/ч. В дальнейшем снижение мощности дозы на следе происходило довольно быстро, что указывает на наличие в составе выброса значительной доли коротко живущих радионуклидов. Некоторые пробы почвы, отобранные в радиусе 500 м от АЭС, показали наличие в ней изотопов плутония. Дальнейший анализ проб позволил установить, что концентрации плутония в пробах находятся на уровне концентраций плутония, связанных с проводимыми ранее атмосферными испытаниями ядерного оружия. Проводятся работы по распылению полимеров для создания защитной пленки на поверхности земли с целью воспрепятствовать распространению радиоактивности вместе с пылевыми частицами.

Количественная информация о радионуклидном составе аварийных выбросов в атмосферу продолжает уточняться. В основном это радиоактивные изотопы: Cs-137, Cs-134 и I-131. Изотоп I-131 представлен в наибольшем количестве. Период его полураспада сравнительно невелик и составляет 8.04 суток. И благодаря этому происходит быстрое снижение мощности дозы на радиоактивном следе. Наличие же в почве изотопов Cs-134 и Cs-137 определяет картину существенно более длительного радиоактивного загрязнения почвенного покрова. Период полураспада Cs-134 составляет 2,3 года. Cs-137 – β, γ – излучающий радиоизотоп цезия с периодом полураспада около 30 лет.

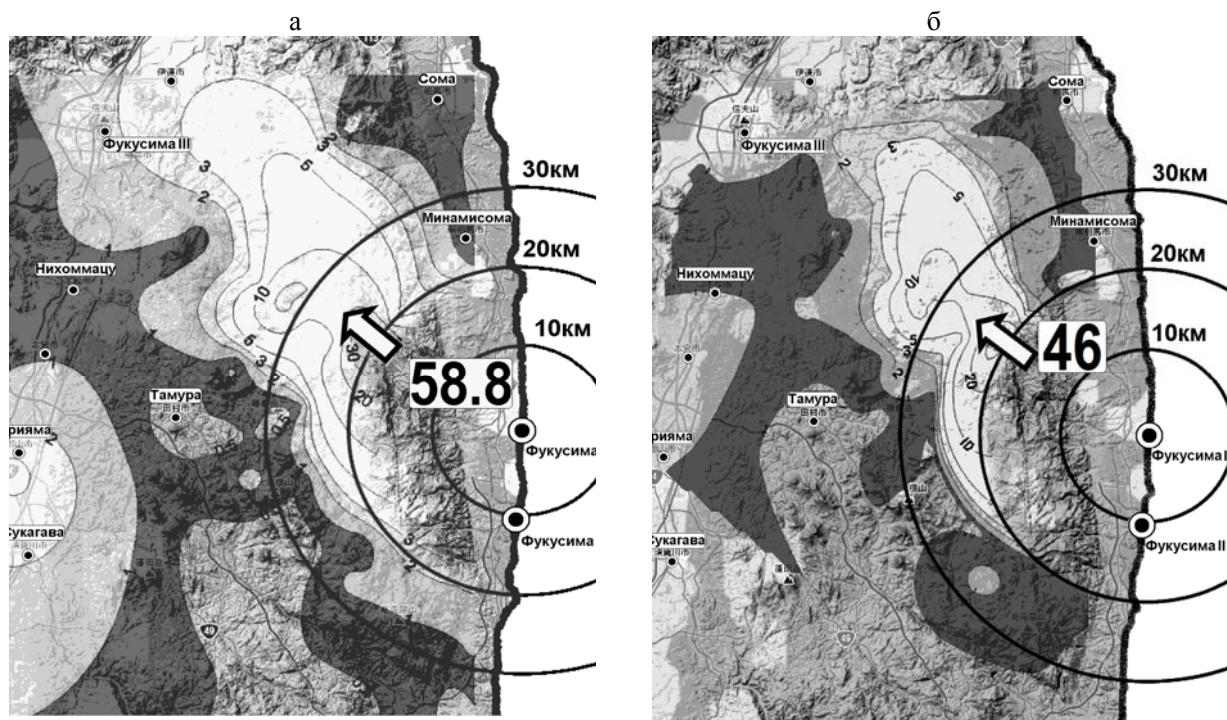


Рис. 1. Карты следов радиоактивного загрязнения почвы от серии взрывов на АЭС «Фукусима – 1»:
а) по состоянию на 7 апреля 2011 г. (мкЗв/ч); б) по состоянию на 7 мая 2011 г. (мкЗв/ч)

На рис. 1а представлена карта мощности доз (мкЗв/ч) на 7 апреля 2011 г., построенная на основании данных передвижного мониторинга. Максимальная доза в 20 км от АЭС на радиоактивном следе к этому времени составила 58.8 мкЗв/ч. Для проведения численной реконструкции загрязнения по оси следа в качестве опорных точек измерений использовались точки со значениями доз 3, 5 и 10 мкЗв/ч. На рис. 2а представлены результаты реконструкции осевой части следа, полученные с использованием соотношения (7), по указанным выше опорным значениям мощностей доз. Анализ результатов численного моделирования показывает, что восстановленная кривая вполне удовлетворительно описывает загрязнение по оси следа и что зависимость (1) позволяет достаточно адекватно воспроизвести спектр распределения выброшенных взрывами на АЭС частиц по скоростям оседания. Быстрый рост мощности доз в направлении к АЭС указывает на то, что подобную тенденцию следует ожидать и внутри 20 километровой зоны. Зависимость (7) позволяет вполне надёжно провести оценивание уровней осевого радиоактивного загрязнения внутри рассматриваемой зоны до расстояний не менее 5 – 10 км от АЭС. Для повышения точности описания уровней загрязнения в ближней зоне необходим более детальный учёт распределения активности по вертикали в момент выброса радионуклидной смеси.

На рис. 1б представлена карта мощности доз (мкЗв/ч) на 7 мая 2011 г., также построенная на основании данных передвижного мониторинга. Максимальная доза в 20 км от АЭС на радиоактивном следе снизилась уже до 46 мкЗв/ч. С учётом замечания 1 для проведения численной реконструкции загрязнения по оси следа в данном случае использовалась лишь одна опорная точка наблюдения, удалённая от АЭС по оси следа на 20 км со значением дозы 46 мкЗв/ч. Соответственно на рис. 2б и 2в представлены результаты реконструкции по состоянию на 24 апреля и 7 мая 2011 г. На рис. 2г приведены результаты реконструкции по состоянию на 11 марта 2012 г. с использованием уже прогнозного поля загрязнения через год после аварии, полученного методами прямого моделирования.

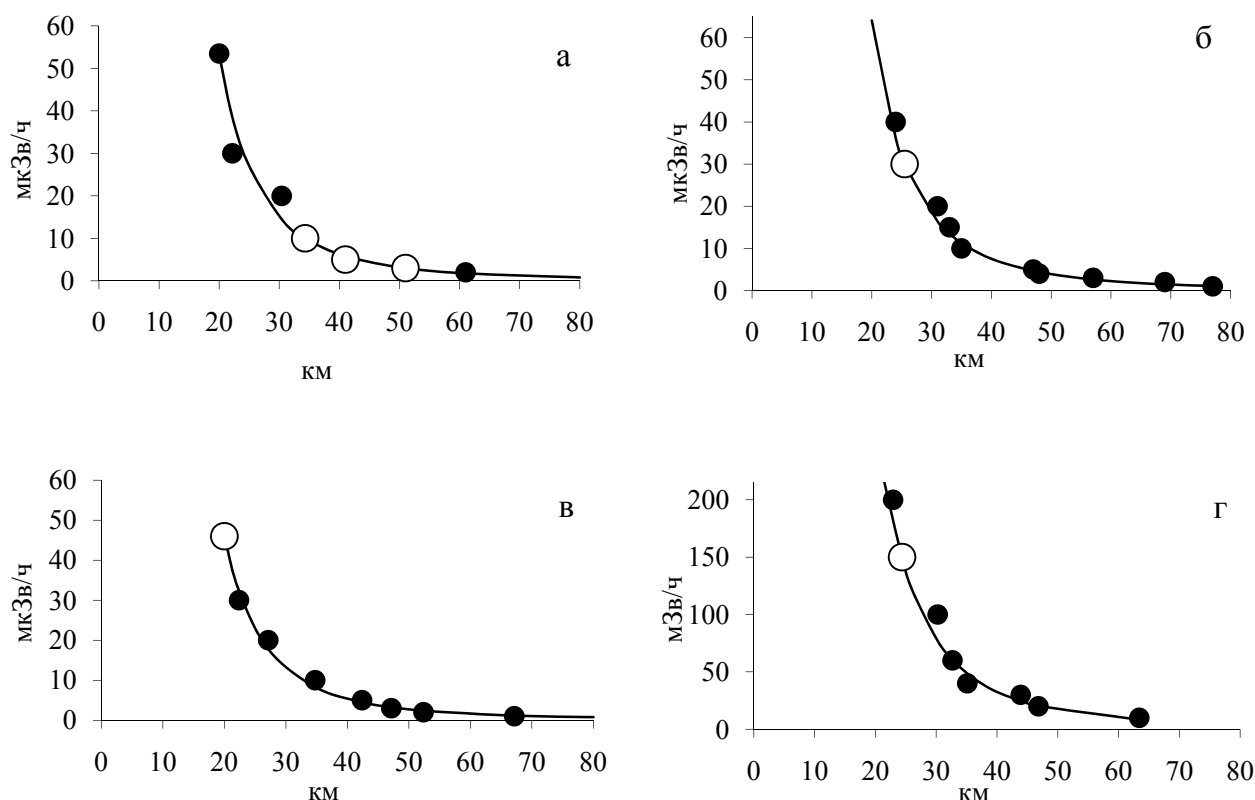


Рис. 2. Численная реконструкция осевой части следа радиоактивных выпадений от аварии на АЭС «Фукусима – 1»: а) по состоянию на 7 апреля, б) – на 24 апреля 2011 г., в) – на 7 мая 2011 г., г) – на 11 марта 2012 г.

— результат численного моделирования, ○, ● – опорные и контрольные точки измерений

Анализ результатов реконструкций, представленных на рис. 2в – 2г, показывает эффективность использования полученных оценок параметров θ_2 , θ_3 по состоянию радиационной обстановки на 7 апреля 2011 г. Продемонстрирована возможность восстановления осевого загрязнения и для других сроков наблюдений по существенно более ограниченной информации. Согласие данных радиационного мониторинга и численной реконструкции в диапазоне расстояний от 20 до 80 км даёт подтверждение как надёжности данных выполненных измерений, так и определённой универсальности полученных оценок параметров θ_2 , θ_3 применительно к рассматриваемому аварийному загрязнению территории в окрестности атомной станции.

Заключение

Разработанная малопараметрическая модель реконструкции выпадений полидисперсной примеси даёт возможность численного анализа данных наблюдений практически по всей оси следа. Для получения оценок неизвестных параметров в зависимости (7) требуется привлечение относительно небольшого числа точек измерений. Как показал численный анализ данных радиационного мониторинга, весьма полезным приёмом оказалось выделение группы параметров, зависящих от характеристик дисперсного состава, что позволило при восстановлении полей осевых концентраций в другие моменты времени дополнительно сократить количество используемых уровней измерений. Весьма необходимой является информация о количественном составе выброшенной в атмосферу радионуклидной смеси. Её наличие позволяет после проведения численной реконструкции поля выпадений нуклидов дать прогноз радиационной обстановки на последующие моменты времени без привлечения дополнительных измерений.

Для повышения точности восстановления полей по данным мониторинга аварийного загрязнения в ближней зоне необходим более детальный учёт вертикального распределения относительной активности в облаке взрыва. В связи с этим полезно привлечение дополнительной априорной информации о характере и мощности произошедших на АЭС взрывах.

Автор выражает благодарность профессору Н. А. Прибатурину за представленную информацию и полезные обсуждения в процессе работы.

Литература

1. Реконструкция фактической картины радиоактивного загрязнения местности в результате аварий и ядерных испытаний [Текст] / Ю. А. Израэль [и др.] // Метеорология и гидрология. – 1994. – № 8.
2. Современная интерпретация данных воздушной и наземной радиационных разведок следа первого ядерного испытания в СССР в 1949 г. [Текст] / И. А. Андрушин [и др.] // Вестник научной программы «Семипалатинский полигон – Алтай». – 1995. – № 2.
3. Рапута, В. Ф. Модели реконструкции загрязнения осевой части Восточно-Уральского радиоактивного следа [Текст] / В. Ф. Рапута // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. – Ч. 2. – Спецвыпуск.
4. Радиоактивное загрязнение местности в результате аварии на радиохимическом заводе в Томске – 7 / Ю. А. Израэль [и др.] // Метеорология и гидрология. – 1993. – № 6.
5. Булатов, В. И. Томская авария: мог ли быть сибирский Чернобыль? / В. И. Булатов, В. А. Чирков. – Новосибирск: ЦЭРИС, 1993. – 32 с.
6. Анализ и прогноз радиационной обстановки в районе аварии на Сибирском химическом комбинате [Текст] / С. М. Вакуловский, В. М. Шершаков, Р. В. Бородин [и др.] // Радиация и риск. – 1993. – Вып. 3. – Приложение 2.
7. Успенский, А. Б. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов [Текст] / А. Б. Успенский, В. В. Федоров. – М.: МГУ, 1975. – 168 с.
8. Pitovranov, S. E. Optimal sampler siting for atmospheric tracer experiments taking into account uncertainties in the wind field [Текст] / S. E. Pitovranov, V. V. Fedorov, L. L. Edwards // Atmos. Environ. – 1993. – Vol. 27A. – № 7.
9. Прессман, А. Я. О распространении в атмосфере тяжёлой неоднородной примеси из мгновенного точечного источника [Текст] / А. Я. Прессман // Инженерно-физич. журн. – 1959. – Т. 2. – № 3.
10. Петров, В. Н. Оценка влияния турбулентного рассеяния по вертикали и в направлении ветра на распространение полидисперсной примеси [Текст] / В. Н. Петров, А. Я. Прессман // ДАН СССР. – 1962. – Т. 146. – № 1.
11. Бызова, Н. Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси [Текст] / Н. Л. Бызова, Е. К. Гаргер, В. Н. Иванов. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 278 с.
12. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы [Текст] / М. Е. Берлянд. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.

Информация об авторе:

Рапута Владимир Федотович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 8(8383) 333-07-21, raputa@sscc.ru

Raputa Vladimir Fedotovitch - Doctor of Physics and Mathematics, leading researcher at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS.