

GPS-ТЕХНОЛОГИЯ В СИСТЕМЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

GPS-TECHNOLOGY IN THE SYSTEM OF GEOECOLOGICAL MONITORING

Л.Б. ПРОЗОРОВ, д.т.н.,
А.С. БАРИНОВ, к.т.н. (ГУП МосНПО «Радон»),
В.Н. МОРОЗОВ, д.т.н.,
В.Н. ТАТАРИНОВ, к.т.н. (Геофизический центр РАН)

L.B. PROZOROV, Doctor of Technical Science,
A.S. BARINOV, Candidate of Technical Science (SUE SIA Radon),
V.N. MOROZOV, Doctor of Technical Science,
V.N. TATARINOV, Candidate of Technical Science
(Centre of Geophysics of the Russian Academy of Science)

■ Для обеспечения сохранности инженерных барьеров хранилищ радиоактивных отходов необходим контроль состояния геологической среды в районах их размещения. Одной из важнейших составляющих такого контроля является оценка комплексного воздействия факторов, вызывающих деформирование верхней части земной коры, на состояние конструкций хранилищ РАО.

■ To ensure integrity of the engineered barriers in radwaste storage facilities it is necessary to monitor the geological conditions in the area where the storage site is located. One of the most important elements of this monitoring is assessment of the aggregate impact of factors that cause deformation of the upper layer of the Earth's crust, and the status of the radwaste storage structures.

СКРЫТЫЕ УГРОЗЫ

Пункт хранения радиоактивных отходов (ПХРО) ГУП МосНПО «Радон» расположен на северо-восточной периферии южного крыла Московской синеклизы. Поверхность кристаллического фундамента коры располагается на глубине свыше 800–1000 м, постепенно снижается в северо-восточном направлении (по линии верхних течений рек Вори, Вели и Дубны). Результаты глубинного сейсмического зондирования свидетельствуют о блоковом строении верхней и средней частей консолидированной коры. Согласно данным гравиметрии, выделяются локальные опущенные и приподнятые блоки кристаллического цоколя; первым в осадочном чехле соответствуют тектонические впадины, а вторым – поднятия высотой до 100 м. В центре одного из них (не на разломе), вытянутого в субширотном направлении на 16 км, и расположены хранилища РАО.

Этот район достаточно спокойный с геодинамической точки зрения. Однако на отдельных участках Восточно-Европейской платформы могут действовать негативные факторы, как природные, так и техногенные, способные нарушить устойчивость геологической среды и привести к разрушению элементов инженерных сооружений.

К ним относятся: высокая активность отдельных участков земной коры в районах расположения тектонических разломов; локальная концентрация полей напряжений, накопленных в течение геологической истории; изменение физико-механических свойств среды под влиянием различных факторов, определяющих эволюцию гидрогеологических условий местности; высокая техногенная нагрузка, которая, в частности, может привести к изменению гидрогеологического режима подземных вод. Под влиянием этих процессов верхняя часть земной коры медленно деформируется, однако даже незначительные смещения в течение длительного времени могут вызвать нарушение бетонных конструкций хранилищ и образование в них макро- и микротрещин. Для выявления негативных природно-техногенных факторов и прогноза их возникновение необходимы исследования слабых горизонтальных

HIDDEN THREATS

The Moscow Radon radwaste storage site is located in the north-eastern periphery of the Moscow syncline's southern wing. The surface of the crust's crystalline foundation is located at the depth of over 800–1000 m, gradually depressing toward north-east (following approximately the same lines as the upper sections of the rivers Vora, Vela and Dubna). The results of deep seismic probing have confirmed the block build-up of the upper and middle consolidated crust. According to gravimetric data, distinguishable are local depressions and elevations of the crystalline base; the former in the sedimentation layer are represented by tectonic depressions, and the latter by elevated areas up to 100 high. The centre of one of these, that extends 16 kilometres in the sub-latitudinal direction, is the location of the radwaste storage site.

This region is fairly "quiet" in terms of geodynamical activity. However, in some areas of the Eastern European platform, certain negative factors are possible, both natural and man-caused, that are capable of disturbing stability of the geological environment and destroying elements of the engineered structures.

Such factors are represented by high activity in some crust areas where tectonic faults are located; local concentrations of tension fields accumulated over the geological history; changes of physical and mechanical properties of the environment caused by various factors that determine the evolution of the local hydrogeological conditions; high man-caused loads, which, in particular, can lead to the changes of underground water hydrogeology. Under the influence of these processes, the upper part of the crust slowly deforms, but even small displacements over long time periods may damage the concrete storage structures and lead to formation of micro and macro cracks. In order to identify the relevant natural and man-caused factors and forecast their occurrence, research of insignificant horizontal crust displacements is necessary along with a system of continuous monitoring.

In 2002–2005, personnel of the Centre of Geophysics under the Russian Academy of Science together with special-

смещений земной коры и организация системы постоянного мониторинга.

В 2002–2005 годах сотрудники Геофизического центра РАН совместно со специалистами Центра геоэкологии и реабилитации территорий ГУП МосНПО «Радон» провели пилотные исследования по оценке возможности применения методов космической геодезии (GPS-технологии) для контроля деформационных процессов. Такие технологии обладают рядом преимуществ перед традиционными геодезическими методами: точность на порядок выше, а сам процесс наблюдения занимает гораздо меньше времени (например, 3 приборами за 2 суток можно измерить плановые координаты и высоты 20–25 реперных пунктов).

Проект должен был заложить основу будущей комплексной системы мониторинга геодинамических процессов, протекающих в верхней части земной коры, в районе ПХРО.

На первом этапе была создана база геолого-геофизических данных, имеющая географическую привязку. Выполнен системный анализ геолого-геофизической информации с использованием геоинформационных технологий, в том числе объемной компьютерной визуализации геологической среды (геоморфология, геологическое картирование, структурно-тектонические модели и разрезы среды, гидрогеологические условия и др.).

Для изучения геодинамических процессов в ближней зоне хранилищ РАО разработали методологию и технологию проведения GPS-наблюдений точностью определения абсолютных координат до 10 мм, а также методику и программное обеспечение высокоточной обработки данных. На основе этого был создан геодинамический полигон, на пунктах которого проведено нескольких циклов GPS-наблюдений. Полученные данные были обработаны, построены временные ряды и векторы

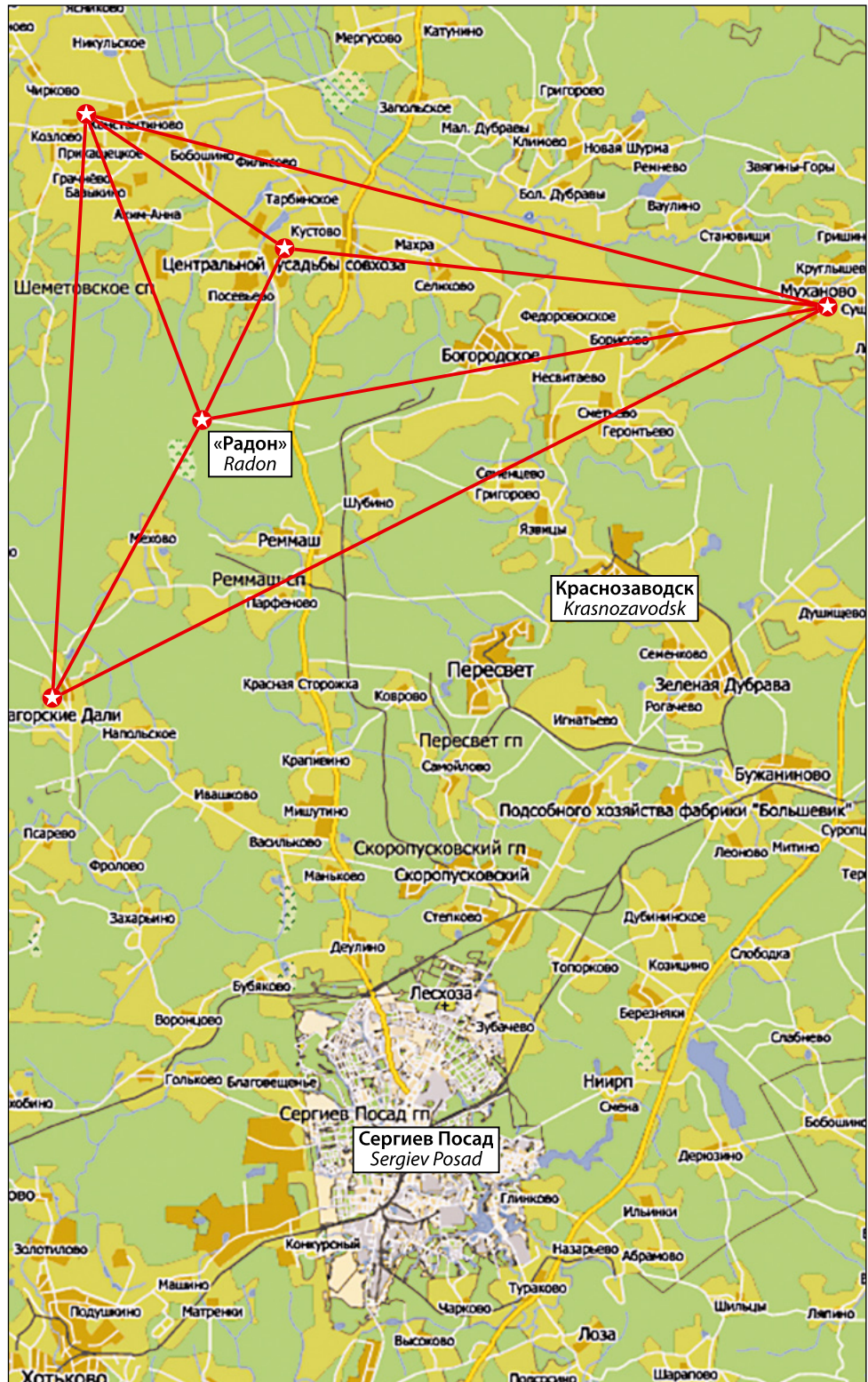


Рис. 1. Карта района и схема региональной GPS-сети в районе ГУП МосНПО «Радон»
Fig. 1. Area map and schematic of the regional GPS network around SUE SIA Radon Moscow

of the Centre of Geoecology and Land Rehabilitation of SUE SIA Radon Moscow performed pilot surveys to evaluate the possibility of applying the space geodesy methods (GPS-technology) in monitoring of the deformation processes. Such technologies have a number of advantages over the traditional geodetic methods: accuracy an order of magnitude higher with the process itself taking a lot less time (for instance, three

смещений земной коры с увязкой с мировой системой координат. Получены предварительные результаты, определены пространственно-временные закономерности и динамика формирования и развития геодинамических и других природно-техногенных процессов в зоне размещения хранилищ.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДТВЕРЖДАЮТ БЕЗОПАСНОСТЬ

Геодинамический полигон ГУП МосНПО «Радон», созданный в 2002 году, состоял из 2 уровней: первый включал 4 GPS-пункта, расположенных в радиусе до 10 км от ПХРО (рис. 1); второй – 12 пунктов непосредственно на территории площадки. Опорная точка располагалась на крыше одного из наземных хранилищ РАО.

Измерения на первом уровне полигона, наиболее удаленном от опорной точки, проводили ежегодно в течение 3–4 часов, внутри площадки – в течение 1 часа. Замеры на опорной точке выполняли синхронно с измерениями на всех реперных точках. Для измерений использовали 3 комплекта навигационной геодезической двухчастотной аппаратуры JAVAD.

В течение 2002–2005 годов были выполнены 4 цикла наблюдений. По их результатам выполнен анализ скоростей смещений земной поверхности.

Далее в каждой точке регулярной сетки для горизонтальных компонент скоростей смещений рассчитали поле нормальных деформаций (дилатацию) – относительное изменение единицы площади, которое отражает среднегодовые горизонтальные деформации сжатия и растяжения поверхности (рис. 2).

Данные предварительных исследований свидетельствуют об общей тектонической стабильности площадки ПХРО. Согласно результатам анализа, скорость среднегодовых смещений достаточно мала и находится в пределах погрешности измерения.

Максимальная скорость деформации, зафиксированная за весь период наблюдений (3 года), составила примерно $2,5 \times 10^{-6}$ в год. При сохранении такой скорости смещения в ближайшие 100–150 лет не произойдет критических деформаций поверхности (их предельная величина для железобетонных конструкций составляет около $3-4 \times 10^{-3}$).

Следовательно, есть основание считать, что в условиях длительной эксплуатации хранилищ РАО маловероятно образование в стенах хранилищ нарушений, которые приведут к выщелачиванию радионуклидов и растворению их грунтовыми водами.

Эти выводы, однако, предварительные. Для обоснования устойчивости геологической среды в районе размещения ПХРО ГУП МосНПО «Радон» наблюдения следует вести 2–3 раза в год в течение, как минимум, 5–6 лет. Сеть опорных точек должна быть в 2 раза плотнее. Вследствие малых величин среднегодовой скорости смещения и с целью повышения точности результатов наблюдений оптимальным было бы размещение в каждом хранилище РАО 2 геодезических пунктов.

В связи с этим на территории ГУП МосНПО «Радон» в течение 2007–2010 годов планируется организация постоянно действующего геодинамического полигона GPS-наблюдений. Будут созданы капитальные реперы наблюдения, в том числе непосредственно на тех

Данные предварительных исследований свидетельствуют об общей тектонической стабильности площадки ПХРО. Согласно результатам анализа, скорость среднегодовых смещений достаточно мала и находится в пределах погрешности измерения.

The preliminary survey data confirms that the radwaste storage site area in general is tectonically stable. According to the analysis results, the average annual displacement rate is fairly small and is within the measurement error.

instruments over two days can measure the position data and heights of 20–25 reference points).

The project was to establish the basis for a future integrated system for monitoring of geodynamic processes in the upper earth's crust in the vicinity of the radwaste storage site.

During the first stage, a system of geological and geophysical data with ties to geographical references was created. Systematic analysis of geological and geophysical information using geoinformational technologies, including volumetric computer visualisation of the geological medium (geomorphology, geological mapping, structural tectonic models and cross-sections, hydrogeological conditions, etc.) was performed.

To study the geodynamic processes in the vicinity of the radwaste storage sites, a methodology and technology were developed that enabled GPS-monitoring with 10 mm accuracy, as well as the methodology and software for high-accuracy data processing. On that basis, a geodynamic polygon was created, where several cycles of GPS-monitoring have been performed. The data obtained was processed, time graphs and crust displacement vectors built and tied to the global positioning system. Preliminary results have been obtained, time and space change patterns identified along with the dynamics of geodynamic and other natural and man-caused processes in the area where the storage facilities are located.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОДТВЕРЖДАЮТ БЕЗОПАСНОСТЬ

Геодинамический полигон СУЕ СИА Радон Москва, созданный в 2002, состоял из двух уровней: первый включал 4 GPS-пункта, расположенных в радиусе до 10 км от РАО (рис. 1); второй включал 12 пунктов непосредственно на территории площадки. Опорная точка располагалась на крыше одного из наземных хранилищ РАО.

Измерения на первом уровне полигона, наиболее удаленном от опорной точки, проводили ежегодно в течение 3–4 часов, внутри площадки – в течение 1 часа. Замеры на опорной точке выполняли синхронно с измерениями на всех реперных точках. Для измерений использовали 3 комплекта навигационной геодезической двухчастотной аппаратуры JAVAD.

В течение 2002–2005 годов были выполнены 4 цикла наблюдений. По их результатам выполнен анализ скоростей смещений земной поверхности.

Далее в каждой точке регулярной сетки для горизонтальных компонент скоростей смещений рассчитали поле нормальных деформаций (дилатацию) – относительное изменение единицы площади, которое отражает среднегодовые горизонтальные деформации сжатия и растяжения поверхности (рис. 2).

Данные предварительных исследований свидетельствуют об общей тектонической стабильности площадки ПХРО. Согласно результатам анализа, скорость среднегодовых смещений достаточно мала и находится в пределах погрешности измерения.

объектах, радиационная безопасность которых требует особого внимания, а также система постоянного наблюдения в режиме on-line с использованием национальной спутниковой системы ГЛОНАСС.

Пилотные исследования доказали эффективность применения GPS-технологии для контроля геологической среды. Этот метод позволяет дифференцировать территорию по скорости деформаций и прогнозировать их изменение во времени. Результаты наблюдений за пространственно-временным изменением полей деформаций могут стать основой построения деформационных моделей верхней части геологического разреза.

С помощью GPS-наблюдений возможна разработка превентивных инженерных и проектных решений по снижению риска разрушения инженерных барьеров. В числе таких решений: укрепление конструкций хранилищ РАО на участках с максимальной скоростью деформации, изменение местоположения и направления длинных осей проектируемых объектов пунктов длительного хранения РАО.

The maximum deformation rate registered over the entire monitoring period (three years) was approximately 2.5×10^{-6} /year. If this rate is maintained, during the next 100–150 years there will be no critical deformations of the surface (critical deformation for reinforced concrete structures equals approximately $3-4 \times 10^{-3}$).

Correspondingly, there is basis to believe that during long-term operation there will only be small probability that the walls of the storage facility will deteriorate so much that radionuclides would leach into the environment and become dissolved in ground waters.

These conclusions, however, are preliminary. In order to justify stability of the geological medium around the Radon radwaste storage site, monitoring needs to be performed 2–3 times a year during at least another 5–6 years. The graticule of monitoring points must be twice as dense. In order to improve accuracy and due to small average annual displacement rates it would seem optimal to place two geodetic posts in each radwaste storage facility.

In connection with this, it is planned that during 2007–2010 there will be a permanent GPS monitoring polygon established

on the Radon radwaste storage site. Capital monitoring references will be created, including on the facilities whose radiation safety requires special attention, as well as a permanent on-line monitoring system, using the GLONASS national satellite system.

Pilot research has proven that GPS technologies are an effective means of geological environment monitoring. This method enables differentiation of the area depending on its deformation rate, and allows forecasting how deformation will change with time. Results that have been obtained through monitoring of the deformation field changes in space and time can be used as basis for building deformation models of the top geological sections.

GPS-based monitoring can facilitate preventive engineering and design measures aimed at reducing the risk of engineered barriers deterioration. Such measures may include reinforcement of radwaste storage structures in areas with the highest deformation rates; re-location and re-direction of long axes during the design of long-term radwaste storage installations.

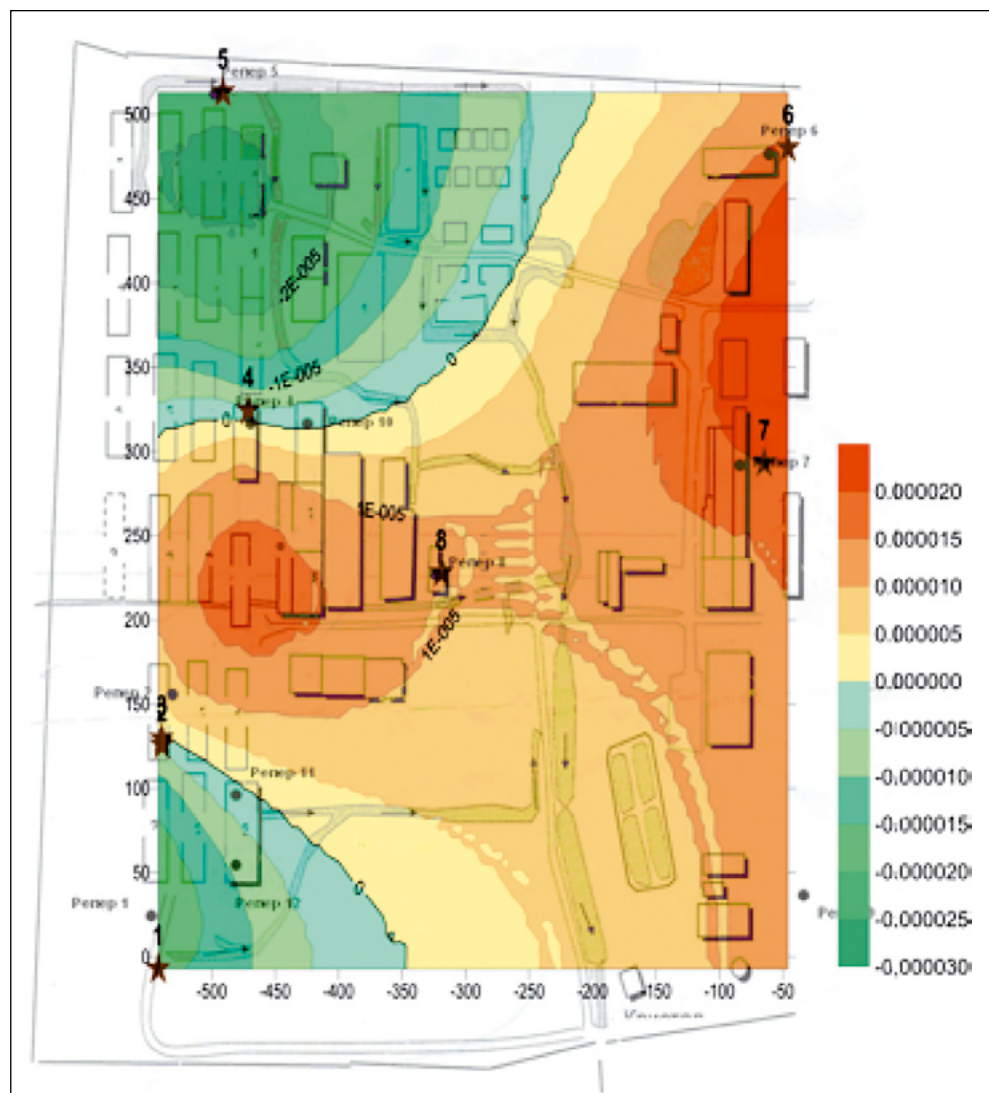


Рис. 2. Карта дилатации земной поверхности (отрицательные значения соответствуют деформациям сжатия, положительные – деформациям растяжения) на полигоне ГУП МосНПО «Радон» за 2002–2005 годы
Fig. 2. Dilatation map of the land surface (negative values correspond to compressive deformations, positive values to tensile deformations) on the Radon polygon during 2002–2005