

В.Н. Морозов, А.И. Каган, В.Н. Татаринов

**ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
НА АРХИПЕЛАГЕ НОВАЯ ЗЕМЛЯ**

Представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния пород в районе пролива Маточкин шар архипелага Новая Земля. Выполнен анализ возможного развития тектонического процесса и инфильтрации подземных вод на основании структурно-тектонической модели и расчета напряженно-деформированного состояния на локальных площадях на территории архипелага, потенциально пригодных для подземной изоляции радиоактивных отходов.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, моделирование, метод конечных элементов, Нижнеканский массив.

Введение

На ядерном полигоне архипелага Новая Земля с 21 сентября 1955 г. по 24 октября 1990 г. (объявление моратория) было проведено 132 ядерных взрыва: 87 атмосферных (в том числе 84 воздушных), 1 наземный (7 сентября 1957 г.), 2 надводных (27 октября 1961 г. и 22 августа 1962 г.), 3 подводных (21 сентября 1955 г., 10 сентября 1957 г., 23 сентября 1961 г.) и 42 подземных. Подземные ядерные взрывы (ПЯВ) проводились в горизонтальных выработках и шахтных стволах на глубинах превышающих 400–500 м от поверхности [1]. При этом использовался подходящий рельеф и горно-геологические условия, обеспечивающие экологическую безопасность ПЯВ. Вместе с тем, геолого-тектонические условия района, сеймотектонические процессы имели второстепенное значение при выборе мест заложения ПЯВ.

Архипелаг Новая Земля, являющийся продолжением Уральской горной системы, находится в условиях активного тектогенеза. Локальная сеть сейсмических станций, функционирующая последние 20 лет в этом районе позволила зафиксировать ряд землетрясений, в том числе и землетрясения $M = 4,6$ с эпицентром в районе пролива Маточкин шар. Причиной сейсмо-тектогенеза в этом районе, вероятнее всего, являются тектонические напряжения сжатия с векторами усилий широтного простирания. Как и в пределах Центрального Урала можно ожидать, что напряжения сжатия могут достигать величин 30–40 МПа. Новые возможности анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) породных массивов в сочетании с космическими съемками и сейсмическими исследованиями позволяют выполнить оценку развития тектонического процесса, как с позиции экологической безопасности зон проведения ПЯВ, так и использования барьерных свойств многолетне-мерзлых пород (ММП), для создания объекта длительного хранения и окончательной изоляции РАО в геологических формациях.

ММП на территории архипелага Новая Земля имеют мощность до 300 м и можно допустить в течение последних 15–20 тыс. лет образование протяженных шлировых структур, которые генетически связаны с разломной тектоникой архипелага. Пластичные свойства льда, в сочетании с пленочной незамерзшей

водой в градиентных полях тектонических напряжений способствуют формированию сутуровидных структур льда, определяющих механизм возможной миграции радионуклидов в условиях возможного глобального потепления климата.

Принятие федерального закона «Об обращении с радиоактивными отходами...», а также предполагаемое расширение транспортных потоков по Северному морскому пути повышают актуальность вопросов обеспечения экологической безопасности в регионе, в том числе вопросов создания и безопасного размещения пунктов долговременного хранения и изоляции РАО. Перспектива дальнейшего использования полигона определяет целесообразность геоэкологического анализа устойчивости геологической среды северной части Южного острова с позиции геодинамики, включающего:

- Разработку структурно тектонической модели центральной части архипелага, в т.ч. палеотектоническую реконструкцию тектонического процесса;
- Моделирование НДС центральной части архипелага с использованием метода конечных элементов;
- Анализ НДС состояния центральной части архипелага с позиции дальнейшего развития тектонического процесса и прогноза формирования ледопородных структур в градиентных полях тектонических напряжений;
- Прогнозные оценки возможных путей фильтрации водных потоков при таянии ММП в условиях глобального потепления климата.

Целью настоящей работы является анализ возможного развития тектонического процесса в пределах архипелага Новая Земля на основании структурно-тектонической модели и расчета НДС локальных площадей на территории архипелага, потенциально пригодных для изоляции РАО.

Результаты исследований

Архипелаг Новая Земля входит в Пайхойско-Новоземельский складчатый комплекс, представляющий сложно построенное «складчатое сооружение» дугообразной формы. В пределах архипелага выделяются два крупных поднятия в южной и северной частях островов. Южно-Новоземельская и Северо-Новоземельская антиформы разделяются Карамакульским прогибом. Структурами более мелкого порядка являются Пахтусовская и Литкенская антиформы [1].

Южно-Новоземельская антиформа (рис. 1) длиной 300 км с северо-востока разрезается глубинным Байдарицким разломом. Особенностью этой структуры являются широко развитые изоклинальные складки, образовавшиеся в результате горизонтального смещения надвинутой Карской зоны в западном направлении. Разломы, осложняющие структуры имеют субвертикальные плоскости смещения. Северо-Новоземельская антиформа, протяженностью 500–600 км, сформировалась в результате субширотного сжатия с доминированием изоклинальной складчатости и образованием надвиговых чешуй. Вдоль крутых разломов образуются широкие (10–15 км) шовные зоны, которые проходят по границам сопряженных Северо-Новоземельской антиформы и Карской впадины.

Геологические структуры Пайхойско-Новоземельского региона более молодые по сравнению с уральскими структурами, с которыми имеют определенное сходство. Время формирования Новоземельской складчатости датируется рубежом триаса и юры. На рубеже триаса и юры весь регион испытал складчатость и скучивание, сопровождающиеся внедрением гранитоидов с возрастом 210–180 млн лет [1]. Современная тектоническая структура сформировалась в период раннекиммерийского тектогенеза.

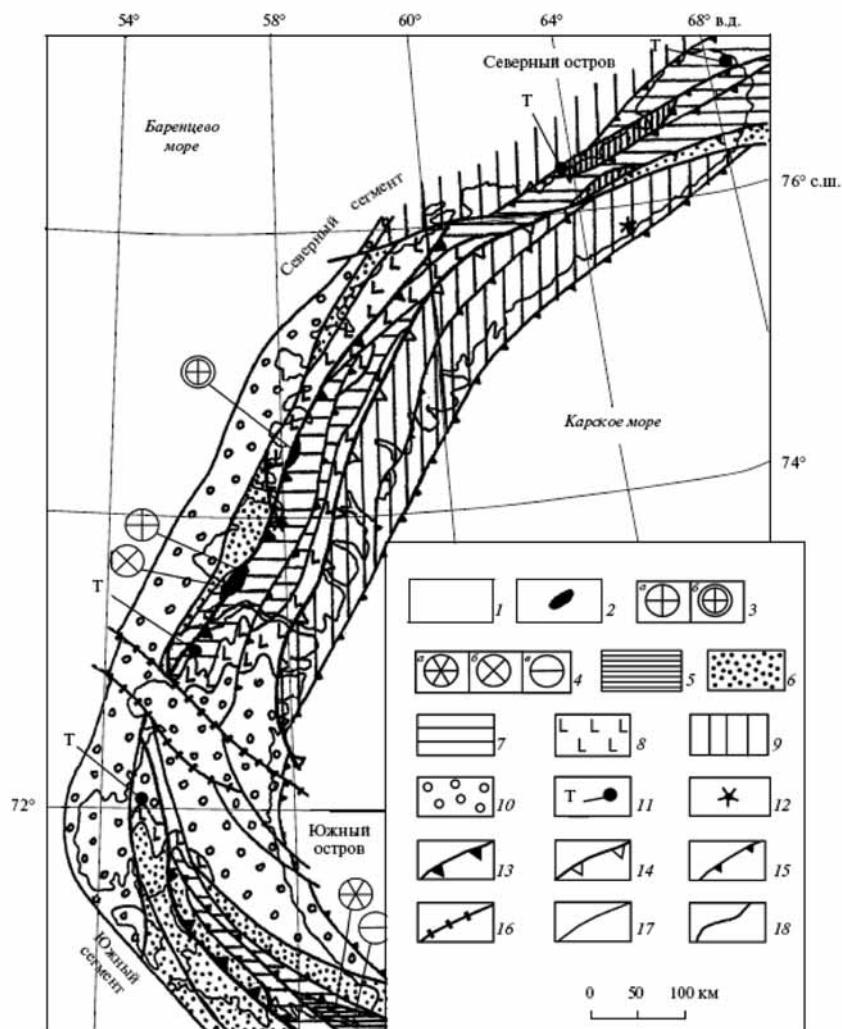


Рис. 1. Тектоническая схема района архипелага Новая Земля [1]: 1 – континентальная плита с чехлом верхнерифейских–нижнекембрийских пород; 2 – фрагменты океанического метабазитового комплекса и гранитоидов; 3, 4 – докембрийские комплексы: 3 – мезопротерозойский метабазит-ультрабазитовые (а) и мезопротерозойские-неопротерозойские гранитоидные комплексы (б), 4 – неопротерозойские комплексы: русановский метабазитовый (а), митюшевский гранитоидный (б), раховский гранитоидный (в); 5 – байкальский орогенный пояс; 6 – кембрийско-каменноугольные шельфовые чехлы эпигренвилльской и эпибайкальской плит; 7–12 – Новоземельский сегмент герцинского орогенного пояса: 7 – Центрально-Новоземельский предпозднедевонский аллохтон, 8 – позднедевонский рифтогенный терригенно-вулканогенный комплекс, 9 – Восточно-Новоземельский позднепалеозойский аллохтон, 10 – верхнепермская-нижнетриасовая пестроцветная моласса, 11 – участки траппового магматизма пермо-триаса, 12 – массивы гранитоидов, преимущественно позднепермского возраста; 13–15 – надвиги герцинского орогенеза: 13 – Главный Новоземельский, 14 – Восточно-Новоземельский, 15 – прочие; 16 – разломы Байдарацкой зоны сдвигов; 17 – сдвиги и надвиги прочие; 18 – границы стратиграфические

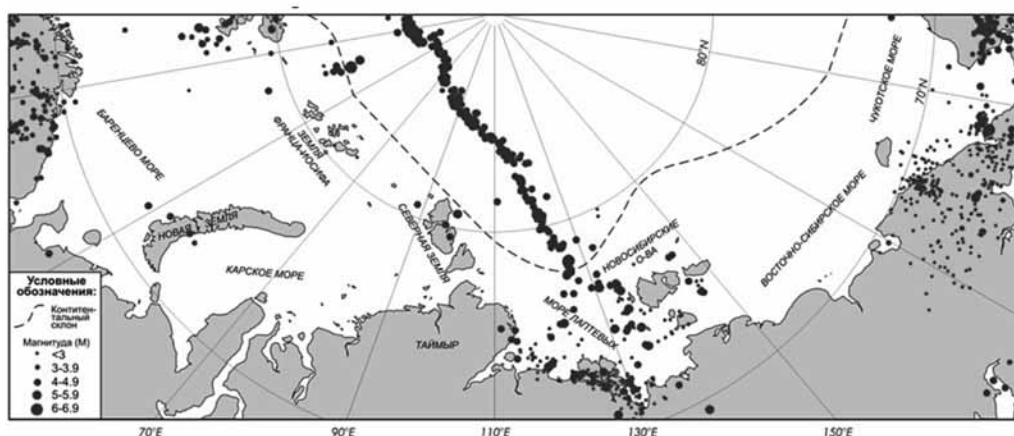


Рис. 2. Эпицентры землетрясений в арктической материковой окраине России

Анализ сейсмических явлений в регионе (рис. 2) позволяет выделить сейсмическую зону, которая трассирует географическое положение пролива Маточкин шар. Новоземельское землетрясение 01,08,1986 г. с $M = 4,6$ с эпицентром вблизи южного берега пролива Маточкин шар дает представление о тенденции современного развития тектонического процесса. Механизм очага землетрясения по данным о полярности Р-волн соответствует взбросу (взбросовой подвижке) в субмеридианной плоскости разрыва под углом 42° на глубине 15 км.

Если воспользоваться корреляционной связью между мощностью земной коры и магнитудой возможного землетрясения в виде [2]:

$$M = 0,087H + 2,7, \quad (1)$$

полученная для Монголо-Охотской зоны с мощностью земной коры до 50–55 км, то для архипелага Новая Земля получим величину

$$M = 6,18 \text{ при } P = 40 \text{ км.} \quad (2)$$

Далее, используя корреляционную связь между амплитудой землетрясения и вероятной длиной тектонического разлома, имеем:

$$L = \frac{M - 4,76}{0,003} = 473 \text{ км.} \quad (3)$$

Если исходить из потенциальной возможности реализации землетрясения в районе пролива Маточкин шар $M = 5$, получаем длину разлома равную 80 км.

В работе [2] приводится уравнение регрессии связи между возрастом пород фундамента и возможной максимальной магнитудой землетрясения:

$$1) M = 0,848 \cdot T + 5,49 \text{ (разлом Танлу),}$$

$$2) M = 0,95 \cdot T + 2,58 \text{ (Монголо-Охотский район),}$$

где T – миллиарды лет.

В пределах архипелага Новая Земля наиболее древними породами считаются нижнепротерозойские-нижнерифейские образования, метаморфизованные в эпидот-амфиболитовой фации породы района губы Северная Сульменева на западном побережье северного острова. Изотопное определение возраста (U-Pb) по цирконам составило для амфиболитов и кристаллических сланцев

1550±80 и 1490±100 млн лет, для гранитов, инъецирующих кристаллические сланцы – 1300±90 млн лет. В то же время возраст, определенный по амфиболу и биотиту (K-Ar) дает значение 645±50 и 587±27 млн лет, что, видимо, отражает возраст позднего метоморфизма.

По оптимистическому сценарию развития процесса тектогенеза в районе, положим значение возможной магнитуды землетрясения $M = 5,96$. Тогда, допуская возможность землетрясений с $M = 6$, существует вероятность пересечения острова тектоническим разломом длиной не менее 100 км. То есть, имеется опасность возникновения протяженных разломов и в большей степени это касается северной части Южного острова и южной Северного, т.е. районов прилегающих к проливу.

Потенциальная возможность возникновения тектонического разлома связана с высокой концентрацией напряжений, возникающих под действиями тектонических сил. В качестве модели локализации тектонических напряжений рассмотрим центральный район архипелага, разделенного проливом Маточкин шар, площадью около 10 км² (рис. 3).

Превалирующим напряжением в регионе являются напряжения сжатия, ориентированные в субширотном направлении, поэтому в качестве рабочей модели мы приняли тектоническую схему, представленную на рис. 3, задав для определенности тектонические напряжения $\sigma_{xx} = 50$ МПа и $\sigma_{yy} = 10$ МПа (ось Y направлена вдоль меридиана, ось X – перпендикулярно). Далее была использована программа расчета НДС, детально изложенная в работе [4].

На рис. 4 и 5 показана концентрация напряжений сдвига и интенсивности напряжений соответственно. Максимальные напряжения сдвига потенциально опасны с точки зрения формирования тектонических подвижек, т.е. образования тектонических разломов содержащих сдвиговую компоненту. Опасность возникновения разломов наиболее вероятна в зонах высокой концентрации τ_{xy} . И в первую очередь это касается юго-западной окраины Северного острова, в зоне примыкающей к «излому» пролива Маточкин шар. Возможность форми-



Рис. 3. Структурно-тектоническая модель центральной части архипелага Новая Земля [1]: 1 – разломы по геологическим данным; 2 – границы блоков, выраженные различными типами; 3 – очаг землетрясения. Стрелки показывают направление действия тектонических напряжений

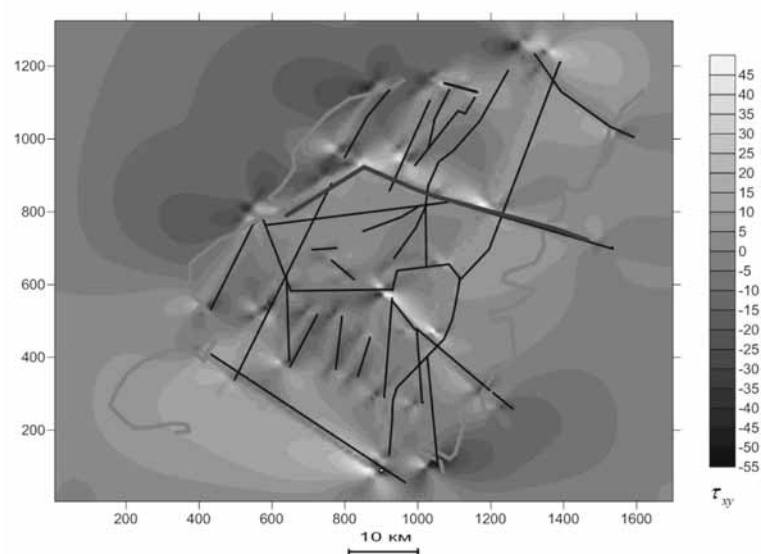


Рис. 4. Распределение касательных напряжений τ_{xy}

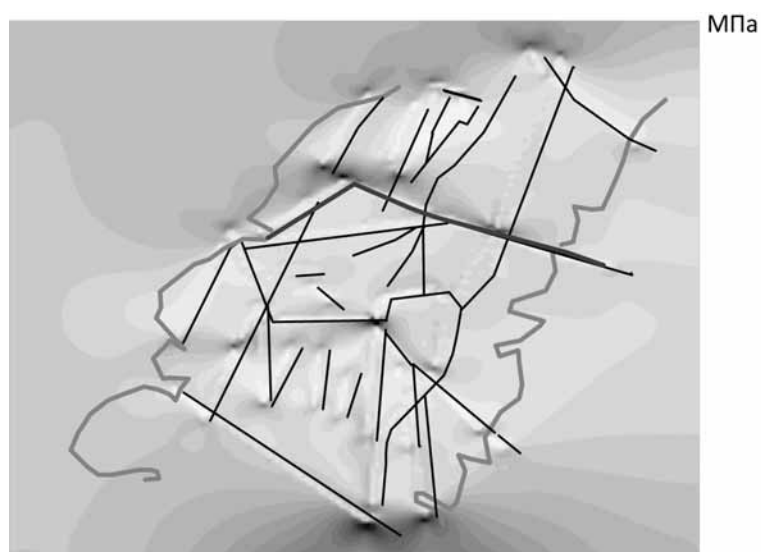


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений σ_i

рования протяженного разлома с выходом в акваторию океана в этом районе наиболее вероятна.

Видно, что расчет НДС позволяет выделить зоны концентрации напряжений, потенциально опасные с позиции возникновения тектонических нарушений, так и зоны разрядки напряжений наиболее безопасные с позиции размещения хранилищ и могильников РАО. Исходя из представлений о наследственности развития тектогенеза в пределах архипелага Новая Земля, следует допустить непрерывный процесс «подкачки» в зоны их аномальной concentra-

ции с момента образования зоны многолетне-мерзлых пород, т.е. в течение последних 8–10 тыс. лет. На это указывает современная сейсмичность района.

Как известно, фильтрация через среду описывается законом Дарси:

$$Q = \omega K \frac{dy}{dx}, \quad (4)$$

где Q – расход потока; ω – площадь поперечного сечения потока; dy/dx – напорный градиент потока; K – коэффициент фильтрации.

Закон Дарси можно записать в следующем виде:

$$V_x = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx}, \quad (5)$$

где V – величина скорости фильтрации через пористую среду; k – проницаемость среды; μ – динамическая вязкость жидкости или газа; P – давление.

Коэффициент k имеет размерность скорости, и, если предположить, что выполняется условие полного насыщения, он зависит от геометрии пористого пространства (типа среды и характеристик пор), а также от удельного веса и вязкости жидкости. Он постоянен для данной жидкости, если пористая среда несжимаема и изотропна.

Для изотропной среды как среды, имеющей одну и ту же проницаемость во всех направлениях можно записать:

$$V_x = -\frac{k_0}{\mu} \frac{dP}{dx}, V_y = -\frac{k_0}{\mu} \frac{dP}{dy}, V_z = -\frac{k_0}{\mu} \frac{dP}{dz};$$

или

$$V = -\frac{k_0}{\mu} \nabla(P), \quad (6)$$

где V – вектор скорости фильтрации. Применив операцию дивергенции к предыдущему уравнению и используя уравнение

$$\nabla \cdot V = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0,$$

получаем:

$$-\frac{k_0}{\mu} \nabla^2(P) = 0. \quad (7)$$

Таким образом, фильтрация сквозь изотропные среды может быть сведена к решению уравнения Лапласа с соответствующими граничными условиями. Если распределение P известно, то скорости фильтрации могут быть получены из закона Дарси в форме (6).

Во многих случаях пористая среда анизотропна и проницаемость зависит от направления течения. В этом случае компоненты вектора скорости фильтрации можно записать в виде:

$$V_x = \frac{k_x}{\mu} \frac{dP}{dx}; V_y = \frac{k_y}{\mu} \frac{dP}{dy}; V_z = \frac{k_z}{\mu} \frac{dP}{dz}. \quad (8)$$

Перейдя к векторной форме и вычислив дивергенцию, получим:

$$\nabla \cdot V = -\frac{k_{0x}}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \frac{k_{0y}}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} - \frac{k_{0z}}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}.$$

Предыдущие уравнение может быть записано в таком виде:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0.$$

Таким образом, мы снова получили уравнение Лапласа. Следовательно, истинный физический случай можно представить как фиктивный изотропный в преобразованных координатах.

Связь между компонентами деформации и смещения в плоской среде имеет вид:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial V}{\partial y} \\ \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (9)$$

В соответствии с законом Дарси будем исходить из предположения, что скорость фильтрации в градиентном поле тектонических напряжений пропорциональна градиенту действующих напряжений:

$$\vec{V}_f = \begin{bmatrix} \vec{V}_x \\ \vec{V}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla \left(kE \frac{\partial U}{\partial x} \right) \\ \nabla \left(kE \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{bmatrix}$$

или

$$\vec{V}_f = \begin{bmatrix} \vec{V}_x \\ \vec{V}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kE \nabla^2 U \\ kE \nabla^2 V \end{bmatrix} \quad (10)$$

в предположение некоторого постоянного коэффициента фильтрации k .

Скорость фильтрации, выраженная через компоненты напряжений, в условиях плосконапряженного состояния, имеет вид:

$$\vec{V}_f = \vec{V}_x + \vec{V}_y = kE (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (11)$$

Для условий анизотропной проницаемости массива ($k_x \neq k_y$).

$$\vec{V}_f = \vec{V}_x + \vec{V}_y = E (k_x \sigma_{xx} + k_y \sigma_{yy}).$$

Тогда используя эти соотношения, представляется возможность расчета и прогнозирования развития гидрогеологических условий в районе заложения могильника РАО при изменении НДС породного массива и изменение климатических условий.

Обратим внимание, что вектор скоростей фильтрации ортогонален направлению действия сил, вызывающих компрессию вдоль соответствующих осей в выбранной системе координат. Уровень напряженного состояния породного массива в его локальных зонах определен величиной интенсивности напряжений. Исходя из предположений, что скорость фильтрации определяется этой

интегральной оценкой уровня действующих напряжений в элементе объема породного массива имеем:

$$\bar{V}_f = \text{grad}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (12)$$

Это упрощает расчеты первого приближения, поскольку задача оценки напряженного состояния и фильтрации решаются отдельно. Зависимость скорости фильтрации от скорости развития деформационного процесса следует из ранее сделанных предположений. Если известна (из экспериментальных данных) скорость изменения тектонических напряжений в пространстве и времени то выражение (12) приводится к виду:

$$\bar{V}_f(t) = kE \nabla \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial t} \right) \quad (12)$$

В этом случае скорость фильтрации, как функция координат и времени $V(x, y, t)$ дает возможность оценок водопритокков в ослабленные зоны тектонической трещиноватости, как основу дальнейших расчетов скорости миграции и прогнозируемой миграции радионуклидов в процессах массопереноса.

Величина водопритока со скоростью фильтрации, зависящей от величины интенсивности напряжений можно записать в следующем виде:

$$Q = Sk \nabla \sigma_i(x) \Big|_{L_{x_1}}^{L_{x_2}}, \quad (13)$$

где S – площадь поперечного сечения (элементарная площадка); k – коэффициент фильтрации, при линейном изменении σ_i на участке $L_{x_1} - L_{x_2}$, а следовательно рассчитать потенциальную опасность водопритока при растеплении ММП, используя экспериментальные данные для конкретного района исследований.

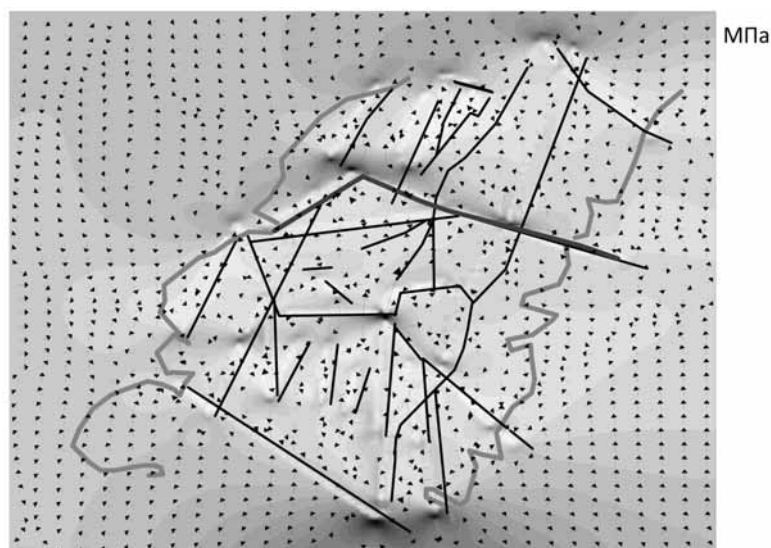


Рис. 6. Направление векторов скорости фильтрации при растеплении массива ММП

Фактически возможность раздельного решения упругой задачи и процесса фильтрации под действием локальных градиентов тектонических напряжений (т.е. без учета деформации порового скелета горных пород) существенно упрощает алгоритм расчета возможных направлений фильтрационных потоков в условиях ММП при их растеплении. Этот алгоритм расчета градиентов напряжений введен в программу расчета НДС массива. На рис. 6 представлены расчеты векторов

$$\overline{G}_{\max} = \text{grad} \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \max$$

максимальных градиентов действующих тектонических напряжений.

В условиях отрицательных температур эти направления соответствуют перемещениям незамерзшей и пленочной воды в ослабленные зоны с формированием сегрегационных залежей льда. Как это видно из рис. 6, максимальные векторы градиентов действующих напряжений направлены внутрь тектонических нарушений.

Это значит:

При возникновении концентрации в вершине разлома (в зависимости от пространственного ориентирования), в условиях отрицательных температур, тектонические разломы (зоны тектонической нарушенности) являются аккумуляторами сегрегационного накопления льда.

При растеплении породных массивов (предположительно за счет потепления климата) эти зоны, в соответствии с законом Дарси, являются «резервуарами» стока грунтовых вод.

При наличии градиента давления в породном массиве эти разломы собой каналы интенсивной фильтрации грунтовых вод, способствующие интенсивной миграции радионуклидов в геологической среде.

При растеплении породных массивов ММП зоны концентрации тектонических напряжений опасны не только с позиции возникновения новых тектонических нарушений, но и способствуют возникновению ориентированных потоков воды в направлении площадей, соответствующих более низким значениям интенсивности тектонических напряжений.

Эти общие фундаментальные закономерности связи между тектоническим напряжением и потенциальной угрозы массопереноса радионуклидов в процессе интенсивной фильтрации грунтовых вод, требуют определенной детализации с позиции разработки инженерных методов расчета радиационной угрозы для окружающей среды.

Потенциальная опасность пересечения разлом площади могильника РАО на территории островов, может быть оценена величиной физического риска возможности одномоментного эпизодического природного воздействия (землетрясение, оползень и др.) по методике изложенной в работах [5, 6].

Физическая уязвимость территории определяется как:

$$V(H) = S_H \cdot S_t^{-1}, \quad (14)$$

где S_H – площадь пораженная опасностью H , S_t – площадь таксона.

Удельный риск поражения:

$$R(H) = P^*(H) \cdot V(H) = P^*(H) \cdot S_H \cdot S_t^{-1} \quad (15)$$

где $P^*(H)$ – вероятность события на территории S_H .

Площадь архипелага Новая Земля составляет 83 тыс. км². Эту площадь принимаем за величину S_H . Площадь таксона – площадь района расположения возможного места подземной изоляции ВАО. Условно площадь таксона принимаем равной 800 тыс. км².

Исходя из данных анализа тектонической нарушенности архипелага Новая Земля тектоническими разломами, принимаем их количество равным 1000, сформировавшихся в течение кайнозоя, т.е. за последние 20 млн лет. Получаем значение вероятности возникновения протяженного тектонического нарушения

$$P^*(H) = \frac{10^3}{2 \cdot 10^7} = 5 \cdot 10^{-5}$$

Подстановка $P^*(H)$ и принятых значений S_H и S_T , приводит к величине ожидаемого риска:

$$R(H) = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 10^2 = 5 \cdot 10^{-3},$$

как среднюю величину риска возможности возникновения тектонического разлома на площади порядка 800 тыс. км². Ситуация осложняется следующим обстоятельством. Пролив Маточкин шар трассируется гипоцентрами неглубоких тектонических землетрясений (5–15 км – глубина гипоцентров) (см. рис. 3). Это касается и Южной окраины архипелага. При магнитуде одного из сильных тектонических землетрясений на Новой Земле $M = 6$ можно ожидать тектонический разлом $L > 100$ км.

Если предположить, что это событие имеет периодичность один раз в 1000 лет, следует допустить, что вероятность формирования протяженного тектонического разлома в районах архипелага, примыкающих к проливу Маточкин шар, значительно выше, т.е. составляет

$$P^*(H) = 10^{-3}$$

При площади могильника РАО равной 8 км², риск достигает величины

$$R_2(H) = 10^{-3}$$

Эти оценки, разумеется, не являются адекватными без расчета реальной угрозы распространения радионуклидов в окружающую среду, но они однозначно требуют постановки и решения соответствующей задачи, приведенной в последующем изложении.

Таким образом, архипелаг Новая Земля находится в зоне активных тектонических процессов. Рассмотрим потенциальную опасность размещения пункта долговременного хранения РАО в верхней части земной коры, размещенного в штольне на глубине 100 м над уровнем океана. Допустим, что в результате тектонической активизации возникает зона тектонического сдвига, захватывающая континентальную часть архипелага и прилегающих акваторий при ширине D , значительно превышающей геометрические размеры могильника.

На первой стадии формирования зоны сдвига, следует допустить формирования с образованием микропрослоев льда в его центральной части, т.е. формирование зоны сегрегации льда под действием напряжений сдвига. На второй, завершающей стадии, образуется зона сдвига (шириной $D > 200$ м), захватывающая могильник РАО. Глубина проникновения зоны сдвига значительно ниже отметки дна прилегающей акватории. За счет высокой дисперсии пород зоны сдвига морская вода постепенно ее заполняет с верхней отметкой, соот-

ветствующей уровню океана. На уровне порядка 1 км при нормальном температурном градиенте температура морской воды около 10 °С, в то время как на уровне моря температура воды соответствует температуре воды в океане (условно 5 °С).

Выше в зоне тектонической деструкции ММП имеем среднюю температуру порядка -2 °С. Эта физическая модель лежит в основе прогнозной модели, описывающей процесс растепления горных пород в ближней зоне могильника и опасность массопереноса радионуклидов в окружающую среду и в первую очередь в прибрежные воды архипелага Новая Земля.

Используя допустимые упрощения поставленной задачи, в окончательном виде сформулируем ее следующим образом.

Начальные условия

- Средняя температура мерзлой толщи на глубине 0 – (-200 м) – -2 °С.
- На глубине (-200 м) – (-1000 м) начальная температура + 5 °С.
- На глубине свыше 1000 м температура + 10 °С.
- Температура РАО соответствует температуре окружающих пород – (-2 °С).

Эти условия соответствуют моменту времени $t_0 = 0$, теплопроводность не зависит от координаты Z , а температура от X .

Задача сводится к оценке возможности растепления сегрегированного льда в зоне могильника с последующим переносом радионуклидов в зону ниже отметки -200 м за время 10^{3-4} лет. В связи с этим, следует допустить потенциальную угрозу изменения НДС зоны сдвига и возможность обратного отжима морской воды в океанические воды акватории. При этом недопустимым уровнем опасности является растепление ММП в зоне могильника до температуры 0 °С за время меньшее периода полураспада наиболее долгоживущих РАО.

Практическую значимость при решении данной задачи приобретает определение максимум глубины заложения могильника с известным периодом полураспада РАО в предположении описанной геодинамической ситуации, т.е. величины порядка H от уровня океана

Если принять во внимание, что максимальная скорость фильтрации вниз составляет $1 \cdot 10^{-7}$ м/сек или 3 м/год, то в процессе фильтрации радионуклиды из могильника, находящегося выше уровня океана на 100 м, в самом неблагоприятном варианте достигнут уровня грунтовых вод менее чем через 35 лет. Разумеется, эта оценка соответствует пессимистическому сценарию развития событий, т.е. не учитывается период полураспада изотопов, не стационарность скорости вертикальной фильтрации, роль конвективного потока и др.

Опасность растепления зоны ММП даже мощностью порядка 500 м и расположение могильника и хранилища РАО в приповерхностной зоне, вероятность достижения радионуклидов уровня океана высока и составляет около 160 лет.

Расчеты возможного растепления горного массива над слоем океанической воды можно существенно упростить, если предположить, что температура на поверхности массива T_s и температура на уровне океана $T_o(H)$ постоянны по времени, а также коэффициент температуропроводности одинаков по всей толще диспергированного массива ($\lambda = \text{const}$). Уравнение температуропроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (16)$$

при этих условиях приводится к виду (одномерная температуропроводность)

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (17)$$

$$\text{при } \begin{cases} x = 0 T = T_1 \\ x = HT = T_o(H) \end{cases}.$$

Интегрирование с выписанными граничными условиями приводит:

$$T = A \cdot x + B$$

или

$$T(x) = (\text{grad}_H T) \cdot x + T_s \quad (18)$$

Следовательно на глубине заложения могильника H_M , температура в условиях стационарного потока тепла будет равна:

$$T_M = (\text{grad}_H T) \cdot H_M + T_s$$

Нулевая изотерма соответствует глубине

$$H(0) = -\frac{T_s}{\text{grad}_{H_0} T} \quad (19)$$

Рассмотрим вариант наиболее безопасного размещения РАО, т.е. допускаем, что штольня с РАО расположена выше уровня океана на величину + 400 м находится в ММП. Тектонический разлом с шириной значительно превышающей размеры ближней зоны могильника захватывает акваторий. На начальной стадии формирования дислокации, как это отмечалось выше, формируется система микротрещин, сопровождающаяся сегрегацией льда в центральной части разлома.

При образовании собственно сдвига за счет трения выделяется достаточное количество тепла для растепления породного массива в зоне сдвига, при этом контейнеры с РАО повреждены и начинается процесс миграции радионуклидов в окружающее пространство. Считаем известным следующие параметры:

Скорость выщелачивание или растворения радионуклидов в воде, а следовательно начальную концентрации радионуклидов в водном растворе C_0 .

Скорость инфильтрации грунтовых вод $\vec{v}$ по вертикальным трещинам, образовавшихся в результате тектонического сдвига.

Для «пессимистического» сценария принимаем, что скорость инфильтрации равна скорости переноса радионуклидов в зону разлома, заполненную морской водой до нулевой отметки.

Задача сводится к расчету радиоактивного загрязнения морской воды в зоне разлома, имеющего выход в акваторий.

Вместе с тем, в течение времени отрицательные температуры на поверхности разлома постепенно проникают на глубокие горизонты, возвращая температурные условия в исходное состояние. Таким образом, возникает необходимость рассчитать скорость продвижения 0 °С изотермы от поверхности к горизонту заложения могильника РАО.

По мере продвижения фронта отрицательных температур с поверхности охлаждение воды идет через образующиеся прослойки льда. В работе [7] приведено решение системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial T_{\text{в}}}{\partial t} = \alpha_{\text{в}} \frac{\partial^2 T_{\text{в}}}{\partial z^2} \\ \frac{\partial T_{\text{л}}}{\partial t} = \alpha_{\text{л}} \frac{\partial^2 T_{\text{л}}}{\partial z^2} \end{cases}, \quad (20)$$

где $T_{\text{в}}$, $T_{\text{л}}$ – температура воздуха и льда, $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{л}}$ – соответственно коэффициенты теплопроводности, t – время, z – координаты.

Время кристаллизации определяется

$$t_{\text{кр}} = \frac{L^2}{\alpha_{\text{в}} \cdot \alpha_{\text{л}}} - \frac{v \cdot L}{\alpha_{\text{в}} \cdot T_{\text{в}}}, \quad (21)$$

где v – скрытая кристаллизация воды равная $0,33 \cdot 10^9$ Дж/м².

Если воспользоваться этим решением, то значение скорости продвижения фазового перехода (изотермы 0 °С) при температуре воздуха -10 °С вглубь массива ориентировочно составляет $7 \cdot 10^{-3}$ м/час. При заложение могильника или хранилища РАО на глубине 300 м от поверхности, РАО будут находиться при плюсовой температуре в интервале времени около 46 лет.

Таким образом, можно рассчитать время, в течение которого радионуклиды способны к миграции в рамках модели адвекции-диффузии в условиях положительных температур локального объема ММП.

Заключение

Расчеты напряженно-деформированного состояния центральной части архипелага Новая Земля в сочетании с результатами сейсмологических исследований дают основания предположить возможность возникновения новых тектонических разломных зон протяженностью более 100 км. Локальные зоны высокой концентрации тектонических напряжений являются источниками возможного возникновения и последующего распространения зон тектонической деструкции. Заполнение этих зон морской водой будет способствовать растеплению ММП с риском возможной миграции радионуклидов. Вместе с тем предварительные расчеты показывают, что радиационная безопасность мест подземной изоляции РАО зависит от их расположения относительно океана. При этом, чем ниже уровень действующих напряжений в структурно-тектонических, тем выше уровень их надежности.

Палеотектоническая реконструкция действующих тектонических напряжений не является достаточной, поскольку она постулирует наследственность тектонического процесса в его современной фазе. Возможности методов космической геодезии были бы хорошим дополнением в прогнозах развития локальной концентрации напряжений. Создание геодезического полигона и специализированные геолого-геофизические исследования (включающие натурные измерения напряжений в горных выработках и скважинах) способствовали бы более высокому уровню прогнозных оценок, в том числе и на длительный период времени, а также более обоснованной разработке критериев приемлемости РАО для предполагаемых к созданию объектов обращения, долговременного хранения и изоляции РАО на архипелаге Новая Земля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатова Н.И., Хаин В.Е. Кратон Арктида и неопротерозойские-мезозойские орогенные пояса циркумполярного региона // *Геотектоника*. – 2010. – № 3. – С. 3–29.
2. Геология и полезные ископаемые России. Т. 5. Арктические и дальневосточные моря. Кн. 1. Арктические моря / Под ред. И.С. Грамберга, В.Л. Иванова, Ю.Е. Погребницкого. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. – 468 с.
3. Николаев В.В., Врублевский А.А., Ахмадулин В.А., Кузнецов В.Е. Геодинамика и сейсмическое районирование материковой части Дальнего Востока. – Владивосток: ДВО РАН, 2000. – 90 с.
4. Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Татаринов В.Н. Моделирование уровней опасности напряженно-деформированного состояния в структурных блоках Нижнеканского гранитоидного массива (к выбору участков захоронения радиоактивных отходов) // *Геоэкология*. – 2011. – № 6. – С. 524–542.
5. Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Методика выбора участков земной коры для размещения экологически опасных отходов // *Геоэкология*. – 1996. – № 6. – С. 109–120.
6. Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Белов С.В., Татаринов В.Н. Напряженно-деформированное состояние Нижнеканского гранитоидного массива – района возможного захоронения радиоактивных отходов // *Геоэкология*. – 2008. – № 3. – С. 232–243.
7. Росман Г.И., Быховских Л.З., Самсонов Б.Г. Хранение и захоронение радиоактивных отходов. – М.: ВИАМ, 2004. – 240 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Морозов Владислав Николаевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, e-mail: v.morozov@gcras.ru,
Каган Александр Иосифович – старший научный сотрудник, e-mail: a.kagan@gcras.ru,
Татаринов Виктор Николаевич – доктор технических наук, зав. лабораторией, e-mail: v.tatarinov@gcras.ru,
Геофизический центр РАН.

UDC 621.039

GEODYNAMIC ASPECTS OF RADIATION SAFETY AT ARHIPELAG NOVAYA ZEMLYA

Morozov V.N.¹, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, e-mail: v.morozov@gcras.ru,
Kagan A.I.¹, Senior Researcher, e-mail: a.kagan@gcras.ru,
Tatarinov V.N.¹, Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory, e-mail: v.tatarinov@gcras.ru,
¹ Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, 119296, Moscow, Russia.

The results of the modeling of stress-strain state rocks in the area Matochkin Shar of archipelago Novaya Zemlya. The analysis of the possible development of a tectonic process of infiltration and groundwater based on structural-tectonic model and calculation of the stress-strain state in local areas on the archipelago, potentially suitable for underground disposal of radioactive waste.

Key words: stress-strain state, modeling, finite element method, Nizhnekansky array.

REFERENCES

1. Filatova N.I., Khain V.E. *Geotektonika*. 2010, no 3, pp. 3–29.
2. *Geologiya i poleznye iskopaemye Rossii*, t. 5. Arkticheskie i dal'nevostochnye morya. Kn. 1. Arkticheskie morya. Pod red. I.S. Gramberga, V.L. Ivanova, Yu.E. Pogrebitskogo (Geology and minerals of Russia), vol. 5. Arctic and Far East seas, book 1. Arctic seas. Gramberg I.S., Ivanov V.L., Pogrebitskiy Yu.E. (Eds.), Saint-Petersburg, Izd-vo VSEGEI, 2004, 468 p.
3. Nikolaev V.V., Vrublevskii A.A., Akhmadulin V.A., Kuznetsov V.E. *Geodinamika i seismicheskoe raionirovanie materikovoi chasti Dal'nego Vostoka* (Geodynamic and seismic zoning of inland Far East), Vladivostok, DVO RAN, 2000, 90 p.
4. Morozov V.N., Kolesnikov I.Yu., Tatarinov V.N. *Geoekologiya*. 2011, no 6, pp. 524–542.
5. Morozov V.N., Tatarinov V.N. *Geoekologiya*. 1996, no 6. C. 109–120.
6. Morozov V.N., Kolesnikov I.Yu., Belov S.V., Tatarinov V.N. *Geoekologiya*. 2008, no 3, pp. 232–243.
7. Rosman G.I., Bykhovskikh L.Z., Samsonov B.G. *Khranenie i zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov* (Storage and disposal of nuclear waste), Moscow, VIMS, 2004, 240 p.