



УДК 621.039.75

ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ В РАЙОНАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ПУНКТОВ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Болдырева Д. А. (Boldyreva@secnrs.ru), Василишин А. Л. (Vasilishin@secnrs.ru),
Понизов А. В. (Ponizov@secnrs.ru), Фелицын М. А. (Felitsyn@secnrs.ru) (ФБУ «НТЦ ЯРБ»),
Борисова О. К., д. г. н. (Borisova@igras.ru), Панин А. В., д. г. н. (A.V.Panin@igras.ru)
(ФГБУН «ИГ РАН»)

В настоящей статье представлены результаты прогнозной оценки основных параметров климата (температура и осадки) на период до 100 000 лет в районах расположения трех действующих в Российской Федерации пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. Приведен анализ международных подходов к долгосрочному прогнозированию климатической эволюции. Разработаны вероятные сценарии развития климата в районах расположения пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов с оценкой вероятности их реализации. Проведена оценка влияния различных вариантов эволюции климата на систему захоронения радиоактивных отходов.

► **Ключевые слова:** пункты глубинного захоронения, жидкие радиоактивные отходы, долговременная безопасность, обоснование безопасности, изменение климата, климатическая эволюция, проекции климатических параметров, региональный климат, долгосрочный прогноз, температура, осадки, репрезентативные траектории концентраций парниковых газов.

DOI: 10.26277/SECNRS.2019.93.3.004

ASSESSMENT OF CLIMATE EVOLUTION IN AREAS OF LIQUID RADIOACTIVE WASTE DEEP DISPOSAL FACILITIES FOR JUSTIFICATION OF LONG-TERM SAFETY

Boldyreva D. A., Vasilishin A. L., Ponizov A. V., Felitsyn M. A. (SEC NRS),
Borisova O. K., Ph. D., Panin A. V., Ph. D. (Institute of Geography RAS)

This article presents the results of a prognostic assessment of the main climate parameters (temperature and precipitation) for a period of up to 100,000 years in the location areas of three deep disposal facilities for liquid radioactive wastes in the Russian Federation. The analysis of international approaches to long-term forecasting of climate evolution is presented. Possible climate evolution scenarios as well as their probability have been developed in the location areas of three deep disposal facilities for liquid radioactive wastes. The impact of various climate evolution options on the radioactive waste disposal system has been assessed.

► **Keywords:** deep disposal facilities, liquid radioactive waste, long-term safety, safety justification, climate change, climate evolution, projections of climate parameters, regional climate, long-term forecast, temperature, precipitation, representative concentration pathways.

DOI: 10.26277/SECNRS.2019.93.3.004

Введение

Пункты глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов (ПГЗ ЖРО) функционируют с 1960-х годов. Захоронение жидких радиоактивных отходов (ЖРО) осуществляется посредством нагнетания в эксплуатационные горизонты [1].

В настоящее время в Российской Федерации функционирует три ПГЗ ЖРО, эксплуатируемых филиалами ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»: «Димитровградский» на промплощадке АО «НИИАР» (г. Димитровград Ульяновской области), «Северский» на промплощадке АО «СХК» (г. Северск Томской области), «Железногорский» на промплощадке ФГУП «ГХК» (г. Железногорск Красноярского края).

Цель исследований и причина их проведения

Для оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО разрабатываются различные геофильтрационные и геомиграционные модели распространения радионуклидов в геосфере. Результаты прогнозных расчетов, выполненных на этих моделях, используются для обоснования возможности продолжения дальнейшей эксплуатации ПГЗ ЖРО и разработки проектных решений по их закрытию.

Одним из источников данных для моделирования являются гидрологические и гидрогеологические режимы районов расположения ПГЗ ЖРО, которые, в свою очередь, опираются на долгосрочный прогноз климатических параметров. К основным климатическим параметрам относят среднегодовые многолетние значения приповерхностной температуры и слоя осадков в районах размещения ПГЗ ЖРО.

Эксплуатационные горизонты всех ПГЗ ЖРО залегают ниже базисов дренирования и ниже глубин распространения грунтовых вод. Вместе с тем объем осадков влияет на гидрологические параметры районов размещения ПГЗ ЖРО, включая режимы поверхностной подпитки эксплуатационных горизонтов и водоносных горизонтов, лежащих над ними.

В рамках выполнения комплексных исследований по обоснованию безопасности эксплуатации и закрытия ПГЗ ЖРО коллективами ФБУ «НТЦ ЯРБ», ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета

и РАН» и ФГБУН «ИГ РАН» в 2017 – 2018 гг. выполнено долгосрочное прогнозирование климатических и гидрологических параметров для формирования сценариев эволюции объектов.

Также был проведен сравнительный анализ международных подходов к прогнозам климатической эволюции при размещении пунктов захоронения радиоактивных отходов (РАО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). В настоящей статье рассмотрены подходы Чехии [2], Великобритании [3] и Швеции [4].

При обосновании безопасности сооружения пункта глубинного захоронения ОЯТ авторами статьи [2] выполнена оценка эволюции климата в районе его планируемого расположения.

При рассмотрении сценариев эволюции природно-техногенной системы захоронения принято, что изменение климата будет влиять на характер и интенсивность экзогенных процессов. Эти процессы включают эрозию горных пород, перемещение продуктов выветривания, гидродинамические процессы на дневной поверхности и в геосфере, деградацию инженерных барьеров. Было принято, что наиболее важными для обоснования безопасности пункта глубинного захоронения ОЯТ будут данные об изменении скорости выветривания и эрозии из-за климатических изменений и о влиянии изменений химических и физико-химических свойств подземных вод на систему захоронения в течение следующих 100 000 лет.

По мнению авторов [2], основными факторами, формирующими будущий климат, будут инсоляция, определяемая параметрами орбиты Земли, и концентрация парниковых газов. Прогнозы возможного развития климата в ближайшие 100 000 лет основаны на двух предположениях. Во-первых, некоторые периоды в истории Земли могут быть приняты в качестве аналогов для будущего климата, во-вторых, параметры орбиты, которые контролируют инсоляцию и климат, могут быть предсказаны с определенной достоверностью в долгосрочной перспективе. Рассмотрены три сценария будущего климата:

- максимальное охлаждение известной климатической формы четвертичных ледниковых периодов;
- максимальное потепление и увлажнение климата, известное из четвертичного межледникового периода;
- эволюция будущего климата под влиянием деятельности человека, приводящей к повышению концентрации CO_2 в атмосфере.

Модели экзогенных изменений зависят от различных временных масштабов эволюции климата. Указанные сценарии рассмотрены для трех периодов времени: несколько столетий, следующие 10 000 лет и следующие 100 000 лет. В сценариях также оценено влияние образования многолетнемерзлых пород в районе размещения пункта глубинного захоронения ОЯТ на гидрогеологический и гидрохимический режим.

В целом в [2], с учетом изолирующих свойств инженерных барьеров, сделан вывод о незначительном влиянии изменений климата на систему захоронения РАО.

Авторами [3] при обосновании безопасности пункта глубинного захоронения РАО в Великобритании предложены модели, которые упрощают основные компоненты климатической системы и базируются на известных будущих изменениях параметров орбиты Земли и вариациях антропогенных вкладов CO_2 . При этом сделана оговорка, что неопределенность прогноза на 100 000 лет обоих параметров (особенно второго) достаточно велика.

Кроме того, учитывалось географическое положение Великобритании, чувствительное к глобальным климатическим изменениям за сравнительно короткие периоды геологического времени (десятки тысяч лет), в связи с наличием движущихся холодных полярных воздушных масс (полярный фронт) и низких широтных теплых океанских течений (Североатлантический Ток).

Результаты прогнозирования изменений климата в долгосрочной перспективе свидетельствуют о возвращении к ледниковым условиям, соответствующим периоду около 90 000 – 170 000 лет назад, однако концентрация CO_2 в атмосфере и влияние глобального потепления могут привести к тому, что следующая ледниковая эпоха не произойдет или будет намного менее интенсивной [3]. Также сделан вывод о том, что для Северной Европы учет возможного образования многолетнемерзлых пород на глубинах до 215 – 320 м является важным фактором при проектировании пунктов глубинного захоронения РАО [3].

С целью обоснования безопасности пункта глубинного захоронения ОЯТ проведено исследование эволюции климата в районах его планируемого размещения [4].

При оценках безопасности для пунктов глубинного захоронения ОЯТ был проанализирован ряд климатических сценариев для оценки возможных экстремальных значений климата на ближай-

шие 100 000 лет [4]. Рассматривались сценарии как потепления климата относительно настоящего времени, так и образования многолетнемерзлых пород в районах размещения пункта глубинного захоронения ОЯТ.

Показано, что появление и отступление региональных покровных оледенений является определяющим фактором влияния климата на систему захоронения в течение 100 000 лет. Данные процессы будут влиять на напоры и состав подземных вод (в том числе за счет их разбавления талыми водами), общее гидростатическое давление, эрозию и растворение скальных пород.

Результаты анализа возможных сценариев изменения климата на период до 100 000 лет свидетельствуют о невозможности образования многолетнемерзлых пород до глубины 300 м [4], однако возможно промерзание подземных вод до глубины 300 м и создание дополнительного давления на стенки контейнеров с ОЯТ.

Результаты анализа международных подходов, изложенных в материалах [2 – 4], показывают необходимость учета изменения климата при обосновании долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения РАО и ОЯТ. Наиболее значительное воздействие на систему захоронения оказывает не сам климат (температура и осадки), а в основном косвенные климатические эффекты: изменение режима и состава поверхностных и подземных вод, возможное образование многолетнемерзлых пород.

Методология исследований, примененная в рамках работы, рассмотренной в настоящей статье, в целом соответствует международным подходам. При разработке проекций изменений климатических параметров использовались результаты докладов МГЭИК [5 – 7].

Сценарии климатической эволюции разрабатывались, исходя из следующих принципов:

- значения прогнозируемых параметров определяются как сумма значений естественного тренда и значений антропогенных изменений, полученных при некоторых сценариях будущего социально-экономического развития, которые формируют соответствующие траектории эмиссии климатически активных веществ (КАВ);

- приповерхностная температура и среднегодовое количество осадков определяются в районах расположения рассматриваемых объектов, например, средние части бассейнов рек Волга, Обь и Енисей, ограниченные территорией в масштабе нескольких сотен километров вокруг каждого

объекта (этот масштаб региональных климатических зон определяется разрешающей способностью реконструкции температуры и осадков для климатического оптимума голоцена и последнего межледниковья);

- в связи с неопределенностью естественных трендов и расхождениями траекторий концентраций КАВ для различных сценариев, значения проектируемых приповерхностной температуры и осадков в каждой временной точке проекции также будут иметь значительный разброс, поэтому результатом проектирования должны были стать диапазоны значений осадков в виде траекторий максимальных и минимальных значений перспективных оценок.

Для оценки антропогенного вклада в изменение климатических трендов приняты оценки изменения приповерхностной температуры в средних широтах Северного полушария, разработанные МГЭИК. Принято, что увеличение выбросов парниковых газов станет причиной дальнейшего потепления и изменения мировой климатической системы до 2100 г.

Согласно прогнозным оценкам МГЭИК приземная температура воздуха будет возрастать в течение XXI века при любых рассмотренных сценариях выбросов, и глобальная средняя температура воздуха в приповерхностном слое увеличится к 2100 г., по сравнению с 1990 г., на 1,4 – 5,8 °С. Данный диапазон соответствует 35-ти основным сценариям в докладе [8].

Вместе с тем для прогнозирования за горизонтом тысячи лет принято, что антропогенным вкладом в изменение климата можно пренебречь. Данное допущение сделано, исходя из анализа двух диаметрально противоположных сценариев социально-экономического развития:

- «оптимистического» сценария – общество обретет полный контроль над техногенным влиянием на климат;

- «пессимистического» сценария – загрязнение окружающей среды, включая неконтролируемый рост концентраций КАВ в атмосфере, приведет к деградации социально-экономической системы, что, в свою очередь, приведет к снижению выбросов загрязняющих веществ.

Кроме того, на данном этапе развития научного знания стабильность планетарной климатической системы в целом не вызывает сомнений и подтверждается данными палеоклиматических исследований на периоды до десятков миллионов лет.

Таким образом, проекции антропогенного изменения температуры после 2100 г. были построены

с учетом того, что следует ожидать стабилизации антропогенного изменения температуры («аномалии» ΔT относительно естественного тренда) после 2100 г. на уровне не выше $\Delta T = + 5,5$ °С с последующим довольно быстрым снижением антропогенной «аномалии» с декрементом порядка 1 °С / 100 лет [9].

Для построения естественных трендов климатических параметров проведен анализ имеющихся палеогеографических и палеоклиматических данных. Основные методы количественных палеоклиматических реконструкций для суши базируются на палинологических данных (анализ состава пыльцы в отложениях). Реконструкции, полученные при помощи этих методов, позволяют проследить изменения основных климатических показателей во времени и географические закономерности в проявлении глобальных потеплений/похолоданий разного ранга для крупных регионов, расположенных главным образом в умеренных широтах Северного полушария.

На данный момент при помощи статистических методов получен большой массив количественных палеоклиматических реконструкций, позволяющих проследить изменения основных климатических показателей во времени и характеризующих состояние климата для ключевых временных срезов позднего плейстоцена и голоцена в ряде крупных регионов, в том числе в умеренных широтах Северного полушария [10 – 13]. Для реконструкции используются минералогические, изотопные, палеоботанические методы. Примеры палеоклиматических оценок на различных временных интервалах приведены на рис. 1 [14, 15].

По результатам проведенных исследований разработаны сценарии изменения основных климатических параметров в рассматриваемых районах – среднегодовых многолетних значений приповерхностной температуры и объема осадков – на рубежах 1 000, 10 000 и 100 000 лет. Для каждого региона рассмотрено два сценария эволюции климата. В связи с отсутствием необходимой статистики и учитывая современный мировой уровень развития научных представлений о климатической эволюции, оценка вероятностей каждого из сценариев основана на материалах докладов МГЭИК [5 – 7].

Разработка проекций (прогнозных оценок) отклонения среднегодовой температуры от современной климатической нормы на период до 1 000 лет проведена по двум сценариям:

- сценарий I – минимальный вклад антропогенного потепления, в целом – стабилизация и постепенное снижение температуры, поскольку возобладает естественная направленность климатических изменений;
- сценарий II – стабилизация антропогенного изменения температуры после 2100 г. на уровне до $\Delta T = + 5,5 \text{ }^\circ\text{C}$ с последующим относительно быстрым снижением антропогенной «аномалии» с декрементом порядка $1 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ лет}$, переход к быстрому похолоданию, аналогичному стадии позднего дриаса.

потепление, аналогичное потеплению позднеледникового/раннего голоцена;

- сценарий II – развитие резкого похолодания длительностью 400 – 700 лет, подобного похолоданию позднего дриаса и другим короткопериодным похолоданиям позднеледникового, развивавшимся на фоне быстрого потепления, длительность современного межледникового принимается аналогичной лихвинскому «супермежледниковью».

При этом на период до 10 000 лет вероятность реализации климатических изменений по сценарию I принимается равной 0,67, а по сценарию II – 0,33.

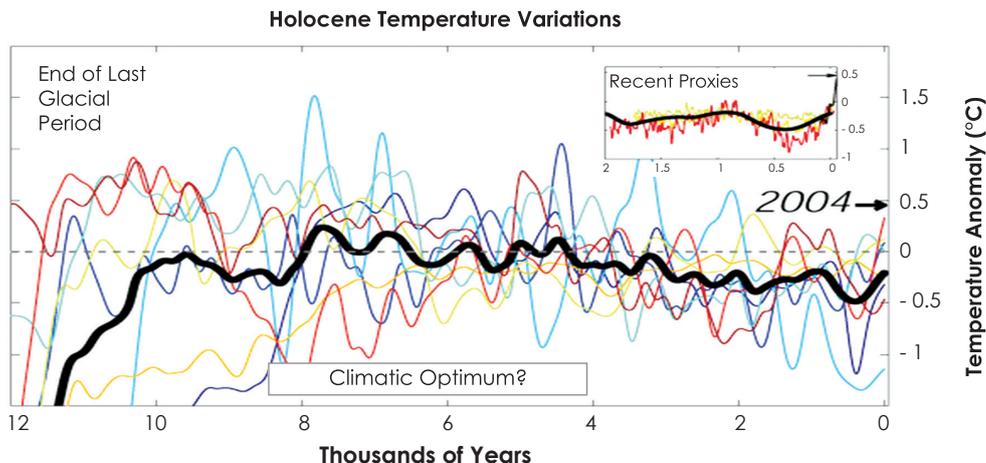


Рис. 1. Изменения среднегодовой температуры воздуха

Цветные линии – реконструкции температур, проведенные разными методами по различным палеоиндикаторам. На врезке показаны колебания температуры за последние 2 000 лет. Жирная линия – изменения среднегодовой температуры воздуха, осредненные для Северного полушария, на протяжении голоцена.

Основные различия двух сценариев состоят в уровне, которого достигнет потепление под воздействием парникового эффекта, прежде чем возобновится естественный процесс похолодания позднего голоцена, и в длительности современного межледникового. При этом на период до 1 000 лет вероятность реализации климатических изменений по сценарию I принимается равной 0,67, а по сценарию II – 0,33.

При прогнозировании на более долгосрочные периоды (до 10 000 – 100 000 лет) также рассмотрено 2 сценария:

- сценарий I – в качестве палеоаналога принят оптимум казанцевского межледникового (при потеплении до уровня оптимума последнего межледникового к концу XXI в.), прогнозируется ускорение процесса похолодания при переходе к последующей ледниковой эпохе через 3 000 – 4 000 лет, за максимальным похолоданием последует быстрое

За горизонтом 40 000 лет изменения климата в рассматриваемых районах по сценариям I и II развиваются одинаково, так как общая длительность межледниково-ледникового макроцикла составляет около 100 000 лет, вне зависимости от продолжительности его межледниковой фазы.

Сценарии для района размещения ПГЗ ЖРО «Димитровградский»

При реализации сценария I в районе размещения ПГЗ ЖРО «Димитровградский» отклонения среднегодовой температуры от современной климатической нормы составят $+2 \text{ }^\circ\text{C}$ в ближайшие десятилетия и $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ в конце XXI в. В случае развития сценария II через 700 – 800 лет среднегодовая температура в данном районе почти достигнет современного уровня. Если же в качестве палеоаналога выбрать похолодание около 8 200 лет назад, то

можно ожидать в 2700 – 3100 гг. развития быстрого потепления (примерно $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) с выходом на термический уровень, предшествующий похолоданию, или несколько более высокий.

В случае восстановления естественного тренда климатических изменений, свойственного постоптимальной фазе голоцена (сценарий I), в районе размещения ПГЗ ЖРО «Димитровградский» будет прослеживаться общая слабая тенденция к увеличению осадков (порядка 10 мм за 1 000 лет). В случае если глобальные изменения температуры в третьем тысячелетии будут развиваться по сценарию II, в средней полосе Восточно-Европейской равнины годовая сумма осадков сократится на 100 – 120 мм при скорости сокращения около 25 мм за 100 лет.

По сценарию I прогнозируется ускорение процесса похолодания при переходе к последующей ледниковой эпохе через 3 000 – 4 000 лет. В случае если современное межледниковье по продолжительности будет подобным лихвинскому/гольштейнскому «супермежледниковью» (сценарий

II), то в течение ближайших 10 000 лет температура воздуха будет медленно возрастать и в данном регионе достигнет отклонения от современного уровня $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$. После 3000 г., в случае реализации сценария I, будет происходить медленное увеличение осадков при небольших колебаниях. По сценарию II, в случае значительно большей длительности современного межледниковья, после резкого сокращения количества осадков при похолодании, аналогичном стадии позднего дриаса, произойдет их восстановление и дальнейшее медленное возрастание.

При построении проекций температуры и осадков в районе размещения ПГЗ ЖРО «Димитровградский» на 100 000 лет по сценарию I, при переходе к следующей ледниковой эпохе одновременно с похолоданием произойдет значительное сокращение количества осадков. По сценарию II общая структура переходного этапа от межледниковья к оледенению будет той же самой.

Проекции температуры и осадков для Ульяновской области приведены на рис. 2, 3.

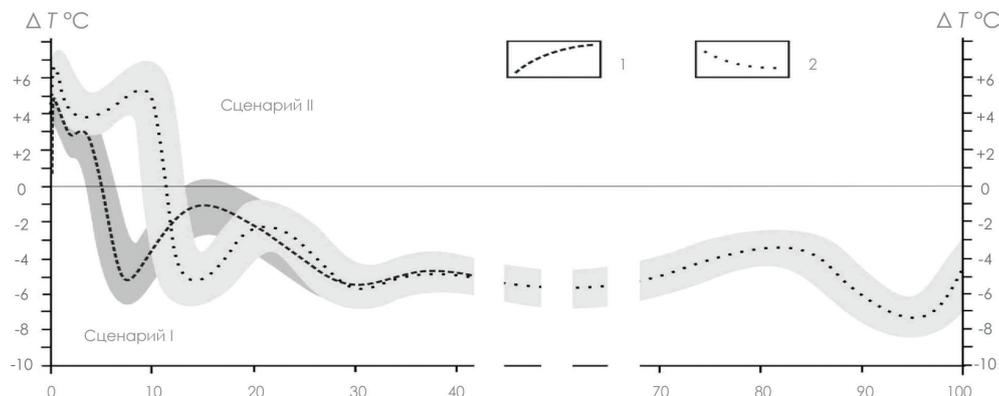


Рис. 2. Вероятные изменения среднегодовой температуры воздуха в районе размещения ПГЗ ЖРО «Димитровградский» (в отклонениях от современной температуры) – проекции на 100 000 лет

1 – сценарий I: восстановление естественного хода климатических изменений, переход к новой ледниковой эпохе при продолжительности современного межледниковья, подобной предыдущему (позднеплейстоценовому); 2 – сценарий II: то же в случае более длительного межледниковья; структура текущего макроцикла и амплитуды основных колебаний подобны реконструированным для межледниково-ледникового макроцикла позднего плейстоцена. Заливкой отмечены вероятные пределы короткопериодных колебаний среднегодовой температуры второго и более высоких порядков, проявляющихся на фоне основных трендов.

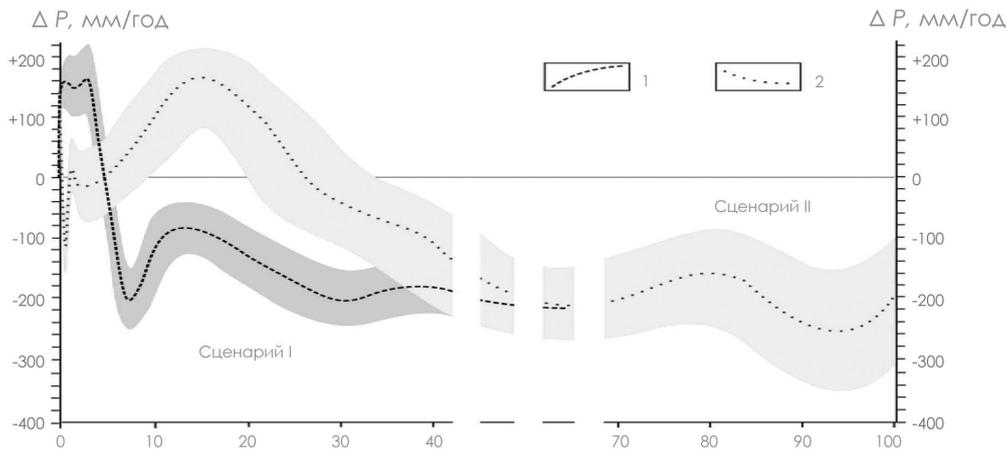


Рис. 3. Вероятные изменения среднегодовой суммы осадков в районе размещения ПГЗ ЖРО «Димитровградский» (в отклонениях от современной величины) – проекции на 100 000 лет

1 – сценарий I: восстановление естественного хода климатических изменений, повышение количества осадков к концу межледниковья и понижение при переходе к новой ледниковой эпохе при продолжительности современного межледниковья, подобной предыдущему (позднеплейстоценовому); 2 – сценарий II: то же в случае более длительного межледниковья; структура текущего макроцикла и амплитуды основных колебаний подобны реконструированным для межледниково-ледникового макроцикла позднего плейстоцена. Заливкой отмечены вероятные пределы короткопериодных колебаний годовой суммы осадков на фоне основных трендов.

Сценарии для района размещения ПГЗ ЖРО «Северский»

По реконструкциям для палеоаналога – оптимума казанцевского межледниковья, при потеплении до уровня оптимума последнего межледниковья к концу XXI в. (сценарий I), в районе размещения ПГЗ ЖРО «Северский» отклонения среднегодовой температуры от современной составят $+3 \pm 1$ °C, а количество осадков возрастет на 150 ± 50 мм в год. Затем до конца текущего тысячелетия будет происходить понижение температуры, сопровождаемое сокращением осадков с трендом 40 мм/1 000 лет. Если по продолжительности современное межледниковье будет подобно предыдущему, через 3 000 – 4 000 лет на переходе к первой стадии следующего оледенения похолодание резко ускорится одновременно с сокращением осадков, которое достигнет $\Delta P -200 \pm 50$ мм в год. Чередование холодных и теплых фаз будет продолжаться около 70 000 лет до наступления наиболее холодной стадии ледниковой эпохи. На основании палеоаналога – максимальной стадии сартанского оледенения – ΔT в данном районе оценивается в $-7 \dots -10$ °C при $\Delta P -350 \pm 100$ мм. За этой стадией последует быстрое потепление, подобное позднеледниковому потеплению при переходе к голоцену.

По сценарию II, вследствие повышения глобальной температуры в XXI – XXII вв. на 5 °C, в данном районе возможно развитие резкого похолодания длительностью 400 – 700 лет. При этом температура и количество осадков практически достигнут современного уровня. К началу следующего тысячелетия температура и осадки вновь возрастут до уровня, предшествующего похолоданию. При длительности современного межледниковья, подобной длительности лихвинского/тобольского «супермежледниковья», в течение следующих 10 000 лет температуры и осадки будут медленно возрастать, и в его конце отклонения достигнут $\Delta T +4 \pm 2$ °C и $\Delta P +150 \pm 50$ мм. На горизонте 20 000 – 40 000 лет сценарии I и II сливаются воедино, поскольку общая длительность межледниково-ледниковых макроциклов неоплейстоцена близка к 100 000 лет. На фоне рассмотренных основных трендов будут проявляться короткопериодные колебания температуры и осадков второго и более высоких порядков с амплитудами среднегодовой температуры не более $\pm 1,5$ °C.

Проекция температуры и осадков для района расположения г. Томск приведены на рис. 4, 5.

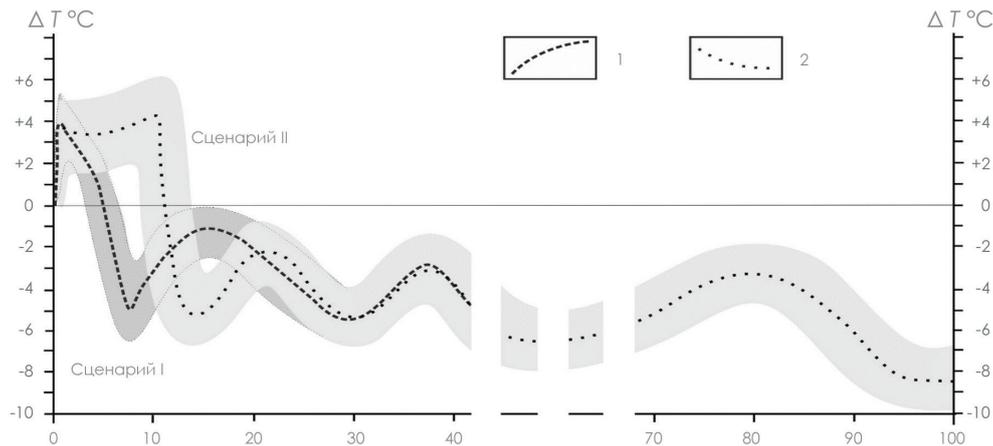


Рис. 4. Вероятные изменения среднегодовой температуры воздуха в районе размещения ПГЗ ЖРО «Северский» (в отклонениях от современной температуры) – проекции на 100 000 лет

1 – сценарий I; 2 – сценарий II. Заливкой отмечены вероятные пределы короткопериодных колебаний среднегодовой температуры второго и более высоких порядков на фоне основных трендов.

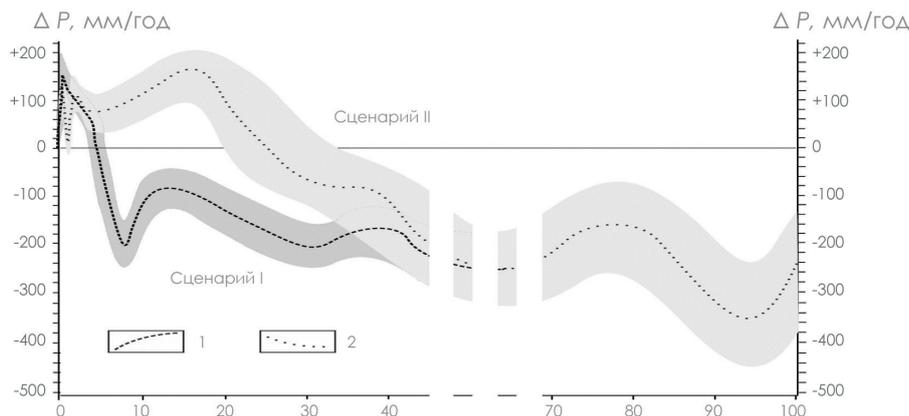


Рис. 5. Вероятные изменения среднегодовой суммы осадков в районе размещения ПГЗ ЖРО «Северский» (в отклонениях от современной величины) – проекции на 100 000 лет

1 – сценарий I; 2 – сценарий II. Заливкой отмечены вероятные пределы короткопериодных колебаний годовой суммы осадков второго и более высоких порядков на фоне основных трендов.

Сценарии для района размещения ПГЗ ЖРО «Железнодорожный»

В качестве палеоаналога антропогенного потепления, ожидаемого к концу XXI в., рассматривается оптимум последнего межледниковья, когда в данном районе отклонение среднегодовой температуры от современного уровня составляло $+4 \pm 1$ °C, а отклонение годовой суммы осадков $\Delta P +130 \pm 50$ мм. По сценарию I, в случае прекращения потепления и восстановления в XXII в. естественной тенденции к похолоданию, до конца

текущего тысячелетия среднегодовая температура и количество осадков будут медленно понижаться. Чередование холодных стадий и теплых интерстадиалов будет продолжаться около 70 000 лет, после чего наступит наиболее холодная (пленигляциальная) стадия оледенения. ΔT в районе исследований в максимум похолодания оценивается на основании реконструкции для максимальной стадии последнего (сарганского) оледенения в $-6 \dots -9$ °C при $\Delta P -200 \dots -450$ мм. За максимальным похолоданием последует быстрое потепление, аналогичное потеплению позднеледниковья/раннего голоцена.

Если повышение температуры в XXI – XXII вв. достигнет уровня +5 °С (сценарий II), вероятно развитие последующего резкого похолодания длительностью 400 – 700 лет, подобного похолоданию позднего дриаса и другим короткопериодным похолоданиям позднеледниковья, развивавшимся на фоне быстрого потепления. Температура и годовая сумма осадков при этом практически достигнут современного уровня. К началу следующего тысячелетия температуры и осадки восстановятся на уровне, предшествующем этому похолоданию.

В случае большей длительности современного межледниковья (до 25 000 лет), в течение следующих 10 000 лет температуры и осадки будут относительно стабильными при тенденции к слабому увеличению к концу межледниковой эпохи. При переходе к следующей ледниковой эпохе произойдет сильное похолодание, которое будет сопровождаться значительным сокращением осадков.

Проекции температуры и осадков для района расположения г. Железногорск приведены на рис. 6, 7.

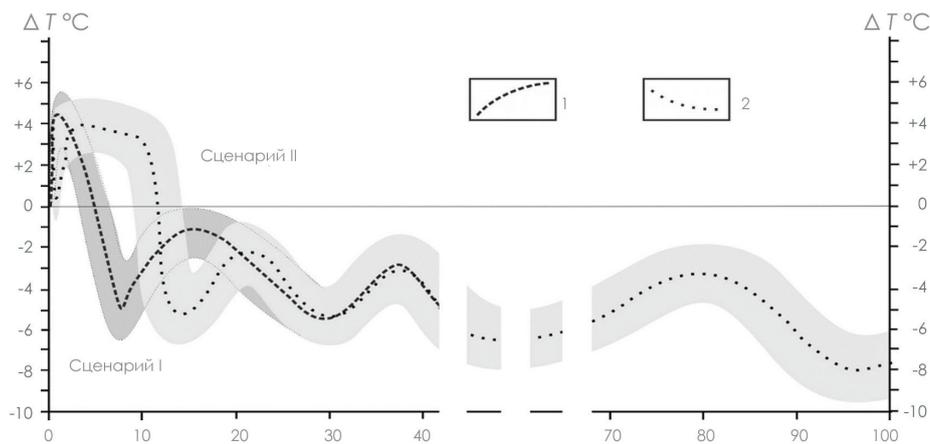


Рис. 6. Вероятные изменения среднегодовой температуры воздуха в районе размещения ПГЗ ЖРО «Железногорский» (в отклонениях от современной температуры) – проекции на 100 000 лет

1 – сценарий I; 2 – сценарий II. Заливкой отмечены наиболее вероятные пределы короткопериодных колебаний среднегодовой температуры, развивающихся на фоне основных трендов.

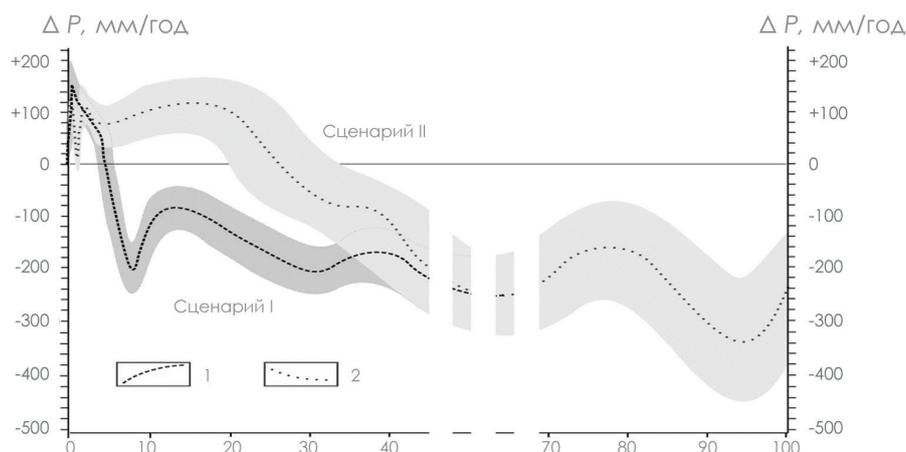


Рис. 7. Вероятные изменения среднегодовой суммы осадков в районе размещения ПГЗ ЖРО «Железногорский» (в отклонениях от современной величины) – проекции на 100 000 лет

1 – сценарий I; 2 – сценарий II. Заливкой отмечены вероятные пределы короткопериодных колебаний годовой суммы осадков.

Полученные результаты будут использованы для уточнения гидрологической и гидрогеологической эволюции в районах расположения ПГЗ ЖРО. В частности, планируется разработка прогнозов по возможности оледенений в данных районах и распространению многолетнемерзлых пород.

Также будет уточнена оценка вероятности истощения емкости верхних водоносных горизонтов, что важно для разработки сценариев эволюции систем захоронения (с точки зрения вероятности проникновения в глубокие водоносные горизонты в поисках воды). Для учета в среднесрочных сценариях (до 500 – 700 лет для ПГЗ ЖРО «Димитровградский» и до 3 500 – 4 000 лет

для ПГЗ ЖРО «Северский» и «Железногорский») вероятность истощения верхних водоносных горизонтов оценивается как низкая. Для оценок на более долгосрочный период данный сценарий более вероятен, однако будет учтен фактор ожидаемого наступления очередного ледникового периода, что приведет к снижению плотности населения.

Результаты исследований будут использованы при разработке сценариев эволюции систем захоронения РАО, уточнении геофильтрационных и геомиграционных моделей распространения радионуклидов в геосфере и обоснования безопасности практики глубинного захоронения ЖРО в Российской Федерации.

Список литературы

1. Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. – М.: Издат, 1994.
2. Pacesa T., Dobrovolnyb P., Holecek J., Nyvltb D., Rukavickova L. Future water-rock interaction in deep repository of spent nuclear fuel // 15th Water-Rock Interaction International Symposium, Procedia Earth and Planetary Science, 2017.
3. McEvoy F. M., Schofield D. I., Shaw R. P., Norris S. Tectonic and climatic considerations for deep geological disposal of radioactive waste: A UK perspective – Science of the Total Environment 571, 2016.
4. Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste // Application to Argillaceous Media // “Clay Club” Workshop Proceedings, Braunschweig, NEA OECD, Germany, 2003.
5. Изменение климата. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Резюме для политиков // МГЭИК, Швейцария, 2013.
6. Пачаури Р. К., Мейер Л. А. Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата // МГЭИК, Женева, Швейцария, 2014.
7. Кокорин А. О. Пятый оценочный доклад МГЭИК // Всемирный фонд дикой природы WWF, Россия, 2014.
8. IPCC Special Report on Emission Scenarios, 2000.
9. Семенов С. М. Парниковые газы и современный климат Земли. – М.: Метеорология и гидрология, 2004.
10. Frenzel B., Pecsli M., Velichko A. A. (Eds). Atlas of paleoclimates and paleoenvironments of the Northern Hemisphere (Late Pleistocene – Holocene) / Budapest: Geographical Research Institute, Stuttgart: Gustav Fisher Verlag, 1992.
11. Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен – голоцен. Атлас-монография // Отв. ред. А. А. Величко. – М.: ГЕОС, 2009.
12. Климанов В. А. Палеоклиматические условия территории СССР в главные термические максимумы голоцена // Плейстоцен Сибири: Стратиграфия и межрегиональная корреляция. Тр. ИГиГ СО АН СССР. Вып. 657, 1989.
13. Климанов В. А. К методике восстановления количественных характеристик климата прошлого // Вестник МГУ, сер. 5, геогр., № 2, 1976.
14. Клименко В. В. Холодный климат ранней субатлантической эпохи в Северном полушарии // М.: Издательство МЭИ, 2004.
15. Котляков В. М., Лориус К. Четыре климатических цикла по данным ледяного керна из глубокой скважины на станции Восток в Антарктиде // Известия РАН. Сер. геогр., 2000.

References

1. Rybalchenko A. I., Pimenov M. K., Kostin P. P. et al. Deep burial of liquid radioactive waste. – Moscow: Izdat, 1994.
2. Pacesa T., Dobrovolnyb P., Holecek J., Nyvltb D., Rukavickova L. Future water-rock interaction in deep repository of spent nuclear fuel // 15th Water-Rock Interaction International Symposium, Procedia Earth and Planetary Science, 2017.

3. McEvoy F. M., Schofield D. I., Shaw R. P., Norris S. Tectonic and climatic considerations for deep geological disposal of radioactive waste: A UK perspective – *Science of the Total Environment*, 2016.
4. Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste // *Application to Argillaceous Media* // “Clay Club” Workshop Proceedings, Braunschweig, NEA OECD, Germany, 2003.
5. Climate change. Physical science fundamentals. Contribution of Working group I to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Summary for policymakers // IPCC, Switzerland, 2013.
6. Pachauri R. K., Meyer L. A. Summary report. Contribution of Working groups I, II and III to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change // IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.
7. Kokorin A. O. IPCC Fifth assessment report // WWF world wildlife Fund, Russia, 2014.
8. IPCC Special Report on Emission Scenarios, 2000.
9. Semenov S. M. Greenhouse gases and modern climate of the Earth. – Moscow: Meteorology and hydrology, 2004.
10. Frenzel B., Pecsli M., Velichko A. A. (Eds). Atlas of paleoclimates and paleoenvironments of the Northern Hemisphere (Late Pleistocene – Holocene) / Budapest: Geographical Research Institute, Stuttgart: Gustav Fisher Verlag, 1992.
11. Paleoclimates and paleolandscapes of the extratropical space of the Northern hemisphere. Late Pleistocene-Holocene. Atlas-monograph // Ed. Velichko A. A. – Moscow: GEOS, 2009.
12. Klimanov V. A. Paleoclimatic conditions of the territory of the USSR in the main thermal maxima of the Holocene // Pleistocene of Siberia: Stratigraphy and interregional correlation. IGIG, Siberian Branch of the USSR Academy of Science. Vol. 657, 1989.
13. Klimanov V. A. On the methodology of restoration of quantitative characteristics of the past climate. *Vestnik MSU*, ser. 5, geogr. No. 2, 1976.
14. Klimenko V. V. Cold climate of the early Subatlantic epoch in the Northern hemisphere // M.: MPEI Publishing House, 2004.
15. Kotlyakov V. M., Lorius K. Four climatic cycles according to ice core data from a deep well at Vostok station in Antarctica // *Izvestia RAS. Ser. geogr.*, 2000.

