
**ПРИРОДНЫЕ
И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

УДК 621.039:551.58:504.062

**ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ
В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ХРАНИЛИЩА
ВЫСОКОРАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ
(участок Енисейский, Красноярский край)**

© 2015 г. Б. Т. Кочкин

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии,
минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН),
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия. E-mail: btk@igem.ru*

Поступила в редакцию 20.03. 2014 г.

Предложено решение по обоснованию долгосрочной климатической изменчивости в районе проектируемого геологического хранилища высокорadioактивных отходов в окрестностях г. Железнодорожска (Красноярский край). Рассмотрены результаты инструментальных наблюдений за климатом Северного полушария и тенденции в его изменчивости, приняты во внимание неопределенности в результатах современных прогностических моделей глобального климата, а также суммированы имеющиеся геологические данные о прошлых климатах района размещения хранилища. Решение заключается в подборе климатов-аналогов из геологического прошлого, которые отвечают главным тенденциям в развитии предстоящих климатов. Даны характеристики основных ландшафтно-климатических условий района размещения хранилища для разных периодов отдаленного будущего.

Ключевые слова: *высокорadioактивные отходы, геологическое хранилище, обоснование безопасности, долгосрочный прогноз климата.*

ВВЕДЕНИЕ

Опасность высокорadioактивных отходов (ВАО) снижается со временем благодаря естественному распаду, при этом долгоживущие радионуклиды будут сохранять радиотоксичность многие миллионы лет. Размещение ВАО и других видов отходов, содержащих долгоживущие радионуклиды, в геологических хранилищах решает задачу надежной защиты населения на исключительно продолжительный период времени. Обеспечение безопасности геологических хранилищ основано на том, что поступление радионуклидов в биосферу, которое рано или поздно начнется, не будет создавать для населения экспозиционных доз и радиологических рисков, выходящих за пределы значений, оговоренных в нормативных документах [2, 3]. Это достигается путем создания вокруг ВАО нескольких барьеров, главный из которых на долгосрочную перспективу – геологическая среда. Биосфера таким барьером не является. Она, как и население, защищаемый объект. В ней как среде обитания будут формироваться экспозиционные дозы и радиологические риски для населения [2].

В этой связи одна из задач при составлении отчета по обоснованию безопасности (ООБ¹) геологического хранилища – создание модели радиационного воздействия на критическую группу населения для проектируемого объекта окончательной изоляции ВАО [3]. Опыт предварительных расчетов показал, что ожидаемое время выхода радиоактивных элементов из хранилища в биосферу и время наступления равновесия между поступающими и распадающимися радиоизотопами может составить сотни – тысячи лет в аварийных сценариях и десятки – сотни тысяч и более лет в случае нормальной эволюции системы изоляции [16].

Для создания модели радиационного воздействия необходимо составить прогноз эволюции биосферы на долгосрочную перспективу, а это в свою очередь предполагает рассмотрение мно-

¹ В англоязычной литературе документ, аналогичный ООБ, именуется “Safety case”, что можно перевести как “До-сье безопасности”. В нем излагаются результаты оценки безопасности системы изоляции, критический анализ аргументов в поддержку ее достоверности, доказательство надежности отдельных элементов системы и др. [2].

Основные компоненты биосферы (по [17])

Основные компоненты	Определение и содержание
Климат и атмосфера Водные объекты	Осредненные метеорологические параметры для региона Поверхностные и близповерхностные водные массы и водоносные горизонты, возможно ледниковые щиты
Человеческая активность	Общины и сообщества, их обычаи и привычки, уровень технологий и способ существования
Биота	Земные и водные растения и животные формы жизни в системе биосферы. Люди не включаются
Близповерхностная литосфера	Почвы и осадки, включая их состав и структуру
Топография	Конфигурация земной поверхности, включая рельеф и позицию природных и искусственных объектов
Географические параметры	Границы и/или объем биосферы
Размещение	Положение биосферной системы на поверхности Земли

жества составляющих биосферу подсистем и внешних факторов, эту эволюцию определяющих (таблица).

За период в миллионы лет в биосферной системе произойдут различные события и процессы, скорость протекания, время проявления и длительность которых могут меняться в широких пределах. В настоящей статье рассматривается только один из переменных, но важнейший и постоянно действующий фактор биосферы – климат.

Этот фактор выбран после анализа так называемых “факторов, событий и процессов (ФСПов)”, с чего начинается разработка вероятных сценариев и любой прогноз [16].

Анализ ФСПов, действительных для биосферы региона проектируемого объекта в Красноярском крае, показал, что особенности природных условий позволяют исключить из рассмотрения многие внешние факторы и события, которые могли бы произойти в биосфере региона за будущие миллионы лет [6]. В частности, геологические условия исключают проявление в регионе вулканизма. Умеренная сейсмичность и сравнительно невысокие скорости вертикальных движений земной коры в районе минимизируют вероятность значимых преобразований ландшафта и конфигурацию биосферы даже в отдаленной на сотни тысяч – миллионы лет перспективе. Расположение района в глубине материка на высотах более 200 м исключает затопление территории морем даже в случае сильного подъема уровня Мирового океана. В районе отсутствуют предпосылки для разработки полезных ископаемых (в том числе подземных вод), что практически исключает масштабные техногенные преобразования окружающей среды, если не считать само сооружение

хранилища – шахт и наружной инфраструктуры. Многие другие ФСПы, которые характеризуются быстрой скоростью изменения, а к ним относятся, прежде всего, биота и население, сколь угодно долгосрочному прогнозу не поддаются. Таким образом, рассмотрение ФСПов, важных для прогноза биосферы в районе размещения хранилища, концентрируется на будущих изменениях климата. К климатическим параметрам относятся температура, осадки, растительность и другие условия, определяющие важные компоненты биосферы, и в том числе образ жизни и хозяйственную деятельность населения, состав биоты и почв.

Возможность достоверного прогноза природных явлений, в том числе и климатических изменений, падает по мере продвижения в будущее. В этой связи обсуждается ряд проблем, касающихся долгосрочного прогнозирования климата: естественная периодичность климатических изменений, закрепленная в инструментальных наблюдениях и геологических данных; период, в течение которого результаты математических моделей изменения глобального климата остаются достоверными; возможные подходы к определению характеристик будущих климатов в регионе хранилища с учетом глобального потепления.

Цель настоящей статьи, раскрыв содержание упомянутых выше проблем, дать характеристики будущих климатов района, выбранного для геологического хранилища в Красноярском крае.

КЛИМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА И ЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Климатическая система отличается сложностью, а ее поведение определяется взаимодействием между атмосферой, океаном, криосферой,

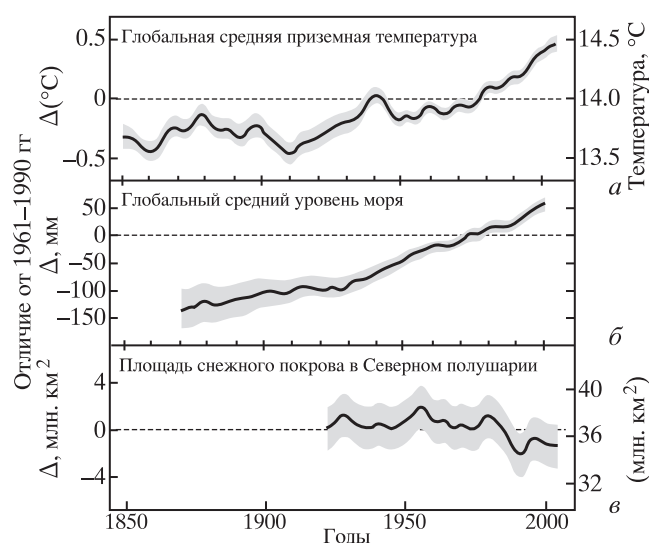


Рис. 1. Наблюдаемые изменения глобальной средней приземной температуры (а), глобального среднего уровня моря (б) и площади снежного покрова в Северном полушарии (в) в марте–апреле (по [5]). Все отличия даны относительно соответствующих средних значений за 1961–1990 гг. Сглаженные кривые представляют десятилетние средние значения, затененные участки – интервалы неопределенности.

биосферой и деятельным слоем суши. Процессы взаимодействия характеризуются нелинейностью и зависят от интенсивности обратных связей. Хотя эта динамическая система чувствительна к малым возмущениям и потому неустойчива, ее медленно меняющиеся компоненты можно прогнозировать на более значительных временных масштабах. Для описания такой системы используют сложные физико-математические модели, включающие основные процессы в указанных средах и взаимодействия между ними [11].

Современные модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) и глобальные климатические модели (ГКМ) позволяют воспроизводить основные особенности поведения климатической системы, включая эволюцию климата за XX в. Модельный эксперимент выполняется на срок обычно порядка 100–200 лет при изменении атмосферных составляющих по определенным климатическим сценариям. В расчетах используются мультимодельные ансамбли и семейства из десятков сценариев. Такой “прогноз” считается заслуживающим большего доверия, чем одиночный расчет. Результаты моделирования принято называть “сценарными проекциями”. В отличие от прямых прогнозов, базирующихся на данных по уже осуществившимся событиям, “сценарные проекции” условны, так как неизвестно, какой из сценариев реализуется в будущем [11].

Успешное воспроизведение климатических трендов прошедшего столетия, обусловленных воздействием естественных и антропогенных факторов, позволяет надеяться, что также можно количественно оценить и предстоящие изменения климата уже с учетом будущих выбросов парниковых газов и соответствующих изменений их концентрации в атмосфере. В целом считается, что можно говорить о том, что математическое моделирование климата достоверно на ближайшее столетие [11].

СОВРЕМЕННОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ И ПРОГНОЗ ЕГО ПОСЛЕДСТВИЙ ДЛЯ СИБИРИ

Потепление климата в последние десятилетия – неоспоримое явление, которое поддерживается общим повышением глобальной температуры воздуха и океана, таянием ледников и повышением глобального среднего уровня моря (рис. 1).

Наблюдательные данные показывают, что рост температур в условиях потепления более значителен в высоких северных широтах [5]. Точно такая же закономерность устанавливается по результатам изучения палеотемператур северного полушария для теплых периодов межледниковий далекого прошлого [4].

Согласно международным экспертным заключениям, считается надежным утверждение, что средние температуры в северном полушарии во второй половине XX в. были, **весьма вероятно**, более высокими, чем в любой другой 50-летний период за последние 500 лет и, **вероятно**, самыми высокими по крайней мере за прошедшие 1300 лет [5]. Эти температуры однако ниже, чем те, что бывали всего несколько тысяч лет назад и много ниже, чем те, что реконструированы для более отдаленного геологического прошлого [4].

С общим потеплением климата согласуется повышение уровня моря и сокращение снежного покрова (см. рис. 1). Точно также в геологическом прошлом в периоды оледенений уровень моря опускался на десятки метров. В это время огромные запасы воды аккумулировались в ледниковых покровах.

Имеются другие тренды в изменении современного климата, например, количество осадков в одних регионах растет, в других, наоборот, падает. Изменчивость в перераспределении осадков характерна и для климатов прошлого.

Есть естественные и антропогенные причины текущего изменения климата. Среди последних

наиболее популярно указывать на связь с промышленной революцией, начавшейся в XVIII в. и сопровождавшейся увеличением выбросов парниковых газов, прежде всего CO_2 .

Экспертное сообщество считает надежным утверждение, что большая доля среднего глобального потепления за последние 50 лет, **весьма вероятно**, вызвана увеличением содержания в атмосфере парниковых газов антропогенного происхождения. Наблюдаемое широкомасштабное потепление атмосферы и сопутствующие явления чрезвычайно трудно объяснить, не привлекая антропогенного воздействия. Более того, **вероятно**, что климатический эффект от выброса парниковых газов даже уменьшается благодаря другим природным процессам [5]. Это значит, что современному пику CO_2 в составе атмосферы должна была бы соответствовать гораздо более высокая температура приземного воздуха, нежели это наблюдается в действительности. Считается, что главные неопределенности в приведенных заключениях экспертов о влиянии выбросов парниковых газов на климат связаны с коротким периодом инструментальных наблюдений, недостатком и неравномерностью данных [5].

В последние годы опубликовано множество расчетов роста температур приземного воздуха по различным сценариям выбросов парниковых газов. Согласно расчетам проекция потепления (рис. 2) составит через 100 лет от 1 до более 3 °C [5]. При этом уровень Мирового океана может повыситься на $0.09 \div 0.88$ м [11]. Значительный разброс в результатах предсказания климата в сценарных проекциях на XXI в., полученных с помощью разных климатических моделей, указывает на существенные неопределенности в таких прогнозах.

В работе [9] приведена оценка изменений климата в XXI в. на территории России и сопредельных стран. Вычисления показали, что на фоне общего глобального потепления в XXI в. наибольшее повышение приземной температуры в Сибири будет в зимнее время. Ожидаемый среднегодовой рост осадков в Сибири, в соответствии с этими прогнозами, также будет наблюдаться преимущественно в зимнее время года и в основном в северных районах. Рост осадков за год приведет к заметному увеличению стока на большинстве водосборов. Так, на водосборах Енисея произойдет накопление дополнительной массы снега зимой, что, в свою очередь, приведет к существенному росту стока за счет его таяния с апреля по май. Вероятность

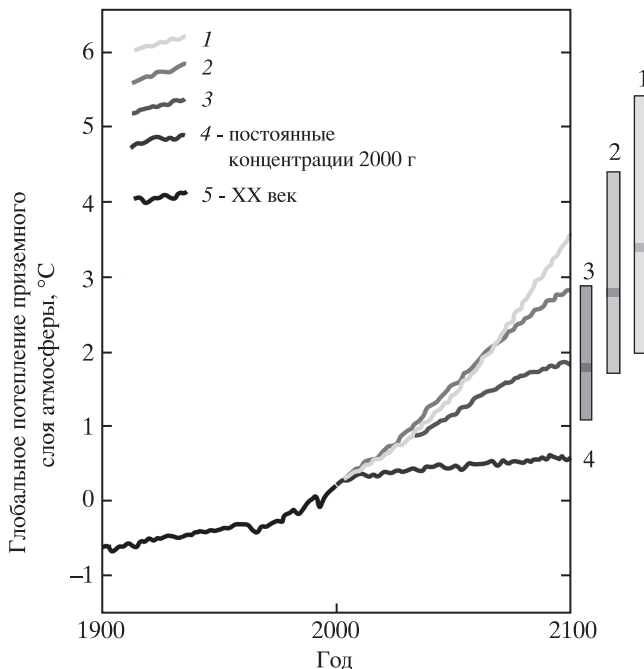


Рис. 2. Потепление приземного слоя атмосферы согласно проекциям модели общей циркуляции системы атмосфера–океан (по [5]). Кривые представляют мультимодельные глобальные средние значения потепления (относительно 1980–1999 гг.) для различных сценариев (кривые 1–3), которые продолжают моделирование XX в. (кривая 5). Кривая 4 соответствует эксперименту, при котором концентрации CO_2 удерживались постоянными на уровне 2000 г. Столбики справа обозначают вероятный диапазон потепления и наилучшую оценку (темная часть столбика) в период 2090–2099 гг. в сравнении с 1980–1999 гг.

крупных весенних паводков на этих водосборах существенно возрастет уже в первой половине XXI в. Потепление климата в Сибири приведет к значительному увеличению глубины протаивания многолетнемерзлых грунтов, главным образом у внешней границы зоны прерывистой мерзлоты.

Изменение температуры на период более первой сотни лет зависит от времени стабилизации выбросов парниковых газов. При самых неблагоприятных сценариях в случае их естественной стабилизации из-за истощения ископаемого топлива к 2070 г., разогрев атмосферы может достигнуть 8 °C через 1000 лет [5]. Рассмотрение прогнозов показывает, что после сравнительно непродолжительного пика CO_2 в атмосфере, связанного со сжиганием ископаемого топлива, природные процессы вернут содержание CO_2 в атмосфере к равновесному в пределах 2000 лет [14].

Ясно, что далее срока в 2000 лет или несколько больше учитывать фактор антропогенного CO_2 при прогнозе предстоящих климатов излишне.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КЛИМАТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ. ГИПОТЕЗЫ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Многообразие факторов, влияющих на изменение климата, принято подразделять на внутренние (атмосфера, океан и др.) и внешние по отношению к климатической системе. Последние, в свою очередь, подразделяются на естественные (например, вариации потока энергии от Солнца) и антропогенные (в основном изменения концентрации парниковых газов в атмосфере) [11]. В интересах статьи эти все факторы можно подразделить по времени действия на краткосрочные и дальнедействующие. Первые порождают естественные быстрые периодические изменения климата вследствие внутренней изменчивости климатической системы. К ним относятся **атмосферные аэрозоли**, основным источником которых служат **вулканические извержения** и хозяйственная деятельность. Эффект от сильного извержения может быть весьма значительным, но непродолжительным по времени (от года до

нескольких лет), и, следовательно, вызывающим колебания температуры на тех же временных масштабах. В настоящее время нет общепризнанной теории, позволяющей прогнозировать вулканическую активность на длительные периоды. **Изменчивость солнечной радиации** подтверждена наблюдениями на коротких масштабах времени. Наиболее выражены 11-летние циклы, связанные с колебаниями солнечной активности. **Парниковые газы** антропогенного происхождения (CO_2 , CH_4 , водяной пар, озон и другие менее важные) окажут более длительное воздействие на климат.

Имеется гипотеза, которая связывает долгопериодные колебания климата с изменением содержания углекислоты в воздухе. Иллюстрацией служат кривые на рис. 3. Они показывают, что интервалы теплого климата прямо приходятся на периоды повышенной концентрации CO_2 в атмосфере. Правда, имеются сомнения в отношении последовательности событий или знака фазового сдвига между колебаниями температуры и атмосферных составляющих. Возможно, что сначала наступает потепление, а затем происходит повышение концентрации CO_2 [15]. Среди естественных причин изменений концентрации углекислоты в атмосфере могут быть некие процессы, регулирующие ее круговорот и иммобилизацию в биосфере и геосфере. Новый антропогенный фактор – сжигание ископаемого топлива и другая деятельность человека – нарушает эти естественные процессы.

Другая гипотеза, предложенная М. Миланковичем [10] еще в первой половине XX в., связывает долгопериодные колебания климата и смену ледниковых и теплых периодов с изменениями солнечной инсоляции. Интенсивность последней зависит от трех основных параметров, определяемых “поведением” Земли на околосолнечной орбите: изменение наклона земной оси по отношению к плоскости ее орбиты, прецессия земной оси и эксцентриситет земной орбиты. Наклон земной оси изменяется с периодом в 40 тыс. лет, прецессия совершает полный круг за 20 тыс. лет, а цикл колебаний эксцентриситета – 100 тыс. лет. Данные, полученные в результате глубинного бурения через ледовый щит на станции Восток в Антарктиде и представленные на рис. 3а, позволили подтвердить наличие изменений климата за последние 420 000 лет с периодичностью около 100 тыс. лет и 40 тыс. лет [11]. К сожалению, гипотеза М. Миланковича не объясняет другие более короткие или более длительные чередования климатов Земли. Некоторые длительные климатические колебания можно связать с перио-

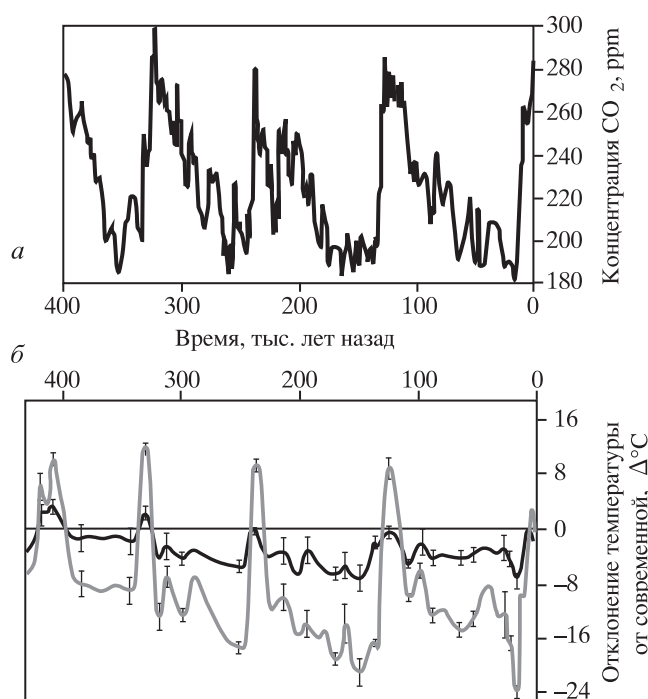


Рис. 3. Сопоставление концентрации CO_2 в атмосфере и температуры воздуха: *a* – оценки среднегодовых значений концентрации CO_2 в приповерхностном слое за период времени примерно от 6000 до 400000 лет до настоящего времени по результатам анализа ледовых кернов со станции Восток, Антарктида (по данным U.S. Department of Energy, Oak Ridge, 2003 (<http://cdiac.esd.ornl.gov/>; цитируется по [11])); *б* – изменения климата за последние 450 тыс. лет в центре Восточно-Европейской равнины. Отклонения температур января (серая кривая) и июля (черная кривая) от современных значений (по [1]).

дом вращения Солнечной системы вокруг центра Галактики (около 200 млн. лет), для объяснения других колебаний в ряде случаев обращаются к внутриземным факторам. В частности, выявлена цикличность тектонических процессов, выражающаяся в смене фаз горообразования и вулканизма с фазами относительного покоя [13].

Отсутствие однозначных объяснений природы периодичности, выявленной в изменчивости климатов, – основной источник неопределенностей в долгосрочном прогнозе будущих климатов. Другая причина неопределенностей – нелинейная динамика климатических процессов. Нелинейность выражается в нестабильном поведении климатической системы, когда относительно малое изменение некоего фактора может вызвать сильные изменения климата [5, 11].

Тем не менее, гипотеза М. Миланковича по существу самая дальнедействующая в отношении предсказания климатов отдаленного будущего, а экстраполяция в будущее температурной кривой, реконструированной разными методами для последних сотен тысяч лет, кажется вполне уместной. Ранее автор уже указывал на эффективность циклических закономерностей в качестве инструмента долгосрочного прогноза [7].

МЕТОДИКА ДОЛГОСРОЧНОГО ПРЕДСКАЗАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА С ЦЕЛЬЮ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ХРАНИЛИЩ ВАО

Количественный прогноз климатических параметров по современным моделям из-за нелинейности и многочисленных неопределенностей в системе, по-видимому, ограничен периодом в 100–200 лет в будущее. При этом практическая потребность в подготовке ООБ для хранилища ВАО, проектируемого на участке Енисейский в Красноярском крае, не может ждать совершенной модели. Необходима специальная методика *ad hoc* предсказания климата отдаленного будущего, адекватно отражающая современный уровень знаний и удовлетворяющая задачам обоснования безопасности, включая требования нормативных документов.

Считается, что образ жизни – один из самых изменчивых и непредсказуемых параметров, которые необходимо учитывать при оценке радиационного облучения и радиологических рисков. Из-за неопределенностей в индивидуальных привычках предлагается использовать так называемый “стилизированный подход” к прогнозу образа жизни будущих поколений [16]. Его суть в пере-

несении существующих привычек и обычаев на отдаленное будущее. При этом следует помнить, что образ жизни населения в целом соответствует климату (прочие различия: доходы, место проживания в селе или городе, национальные особенности питания и пр. можно игнорировать) и, в соответствии со “стилизированным подходом”, современные образы жизни и, соответственно методологии расчета доз и рисков, можно распространять на будущие климаты. Так, население г. Железногорска (рядом с проектируемым хранилищем) при резком похолодании климата примет образ жизни населения г. Норильска, а в случае еще большего похолодания и наступления ледника вообще покинет сегодняшнее место жительства. Точно также, при чрезвычайном потеплении климата, например, до субтропического – образ жизни железнодорожников может стать как у батумцев (жарко и влажно) или как у калифорнийцев (жарко и сухо) и т.д.

Исходя из сказанного, рекомендуется следующая методика предсказания будущих климатов в процессе подготовки ООБ:

- составление кривых исторических температур в регионе будущего хранилища на период от сотен тысяч – до первых миллионов лет назад с целью идентификации исторических климатов и естественной периодичности их смены;

- экстраполяция исторической кривой потепления-похолодания климата на период необходимого прогноза безопасности (десятки – сотни тысяч лет в будущее) с учетом влияния антропогенного фактора (парниковый эффект);

- выбор исторических аналогов температурных условий, существовавших в регионе хранилища, с целью получения ландшафтно-климатических характеристик будущего.

Впоследствии, уже в ходе выполнения оценки безопасности и получения результатов по расчетам времен выхода (или времен равновесия поступления – распада) радионуклидов в биосферу, будет выбран соответствующий климат-аналог на основе кривой периодов потепления-похолодания. На рис. 4 показана условная ситуация выбора климата-аналога для аварийного и базового сценариев выхода в биосферу несорбируемых и сорбируемых радионуклидов. Предварительные расчеты показали, что сорбируемые U и Pu будут распространяться в геологической среде участка Енисейский со скоростями порядка 100 м/1000 лет [8]. При самых неблагоприятных условиях они могут оказаться в биосфере через 5000 лет. Несорбируемые и плохо сорбируемые

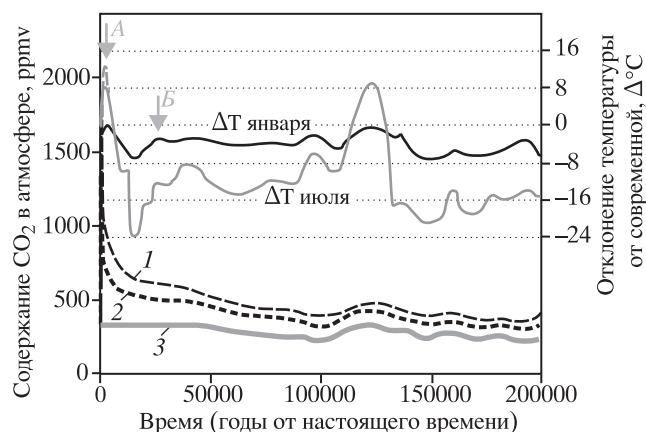


Рис. 4. Условная ситуация, иллюстрирующая выбор климата-аналога для аварийного (А) и базового (В) сценариев выхода радионуклидов в биосферу. Прогнозируемые содержания CO_2 в атмосфере для разных сценариев (1–3) взяты из работы [14]. Прогнозируемый ход кривой температур января и июля состоит из двух частей: в зоне высоких содержаний парниковой CO_2 – модельные оценки потепления с учетом парникового эффекта в ближайшие 1000 лет [5], далее на долгосрочную перспективу – экстраполяция кривых с рис. 3б.

радионуклиды (^{129}I , ^{79}Se , ^{135}Cs и др.) могут оказаться в биосфере еще раньше. В базовом сценарии даже самые подвижные радионуклиды попадут в биосферу не ранее, чем через десятки тысяч лет.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЛЕТОПИСЬ ИЗМЕНЧИВОСТИ КЛИМАТА В РЕГИОНЕ ПРОЕКТИРУЕМОГО ХРАНИЛИЩА

Реконструкции палеоклиматов выполняются на основе изотопных анализов осадков и оценок температур, полученных по палеофлористическим и другим данным. Точность количественных реконструкций палеотемператур составляет $\pm 1^\circ\text{C}$ [4]. Реконструкции выполняются для больших территорий по относительно небольшому количеству местонахождений и разрезов. Несмотря на неравномерность пространственного распределения точек и наличие обширных “белых пятен”, реконструкции позволяют получить представление об основных особенностях распределения климатических показателей.

В районах, где нет осадков, соответствующих определенным периодам геологической истории, там не будет и оценок возраста. Возвышенные районы Енисейского кряжа, к одному из которых приурочена площадка будущего объекта, как раз лишены подобной информации на большую часть недавней (в геологическом масштабе) истории. В этой связи для характеристики прошлых кли-

матов Енисейского кряжа приходится обращаться к соседним “хорошо изученным” территориям.

Известно, что одно из самых значительных потеплений климата в истории Земли пришлось на палеоцен и эоцен (около 60–40 млн. лет назад). В это время в Западной Сибири господствовал теплый, близкий к субтропическому климат. Среднегодовые температуры достигали 20°C и более. Количество осадков было более 1000 мм в год. Западно-Сибирская равнина была затоплена морем. По ее обрамлению, в частности в районе Красноярска, была распространена субтропическая растительность [4].

Гумидная монозональная (господство лесной влажной зоны) структура ландшафтов при последующем общем похолодании и аридизации климата постепенно сменилась широтной дифференциацией ландшафтов – от тундр до степей. Современная климатическая система в Сибири начала формироваться около 15 млн. лет назад и установилась в параметрах, близких к современным, только в плейстоцене (менее 1.6 млн. лет назад). В значительной степени это связано с новейшим горообразованием, начавшимся в конце олигоцена – начале эоцена. Появившиеся высокогорья (в частности Алтай и Саян на южной границе Западно-Сибирской равнины) стали препятствием для теплых влагонесущих воздушных масс с экватора, а дополнительному охлаждению способствовал замерзающий Полярный бассейн [1, 4].

Около 1 млн. лет назад, в плейстоцене, колебания климата на территории северной Евразии приобретают вид регулярного чередования ледниковых и межледниковых эпох. Современная ситуация отвечает теплой межледниковой фазе. Эта фаза началась 10.3 тыс. лет назад, а ее термический оптимум пройден 6.0–5.5 тыс. лет назад в так называемый Атлантический период. Следовательно, современная ландшафтно-климатическая обстановка приходится на вторую половину текущего межледникового интервала. Она характеризуется тенденцией к похолоданию, связанному с приближением новой ледниковой фазы [1].

На рис. 5 показаны интервалы различных климатов и отдельные точки установленных значений исторических температур для юго-восточного района Западной Сибири. К сожалению, даже обширный материал, собранный в монографиях “Изменение климата ..., 1999” и “Палеоклимат и ..., 2009” [4, 12], не позволил детально реконструировать ход температурных кривых в регионе проектируемого хранилища. В этой связи намечены только общие тренды изменения темпера-

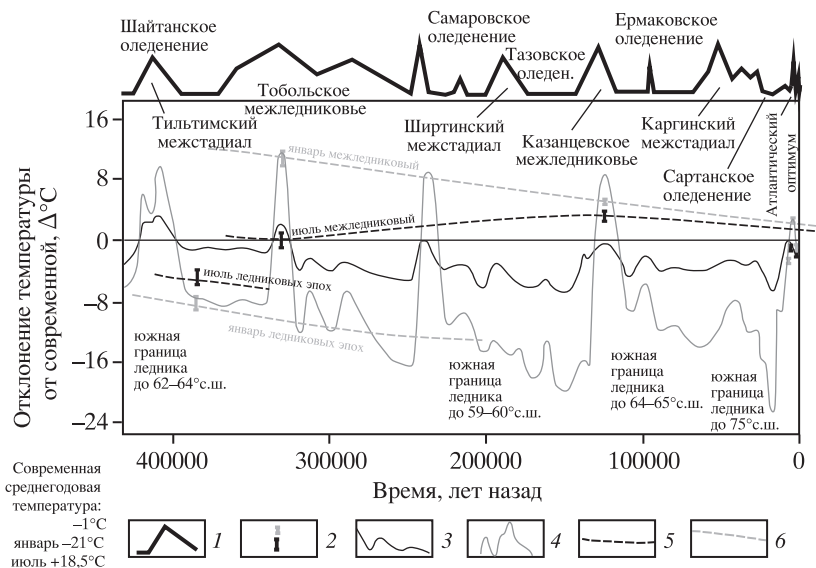


Рис. 5. История климатов за 400 000 лет в районе проектируемого хранилища в Красноярском крае (составлено по материалам книг [4, 12]): 1 – кривая, показывающая продолжительность и общее изменение климатов в районе; 2 – установленные значения исторических температур января (серый) и июля (черный) для юго-востока Западной Сибири; 3–4 – кривые отклонения температур января (серая) и июля (черная) от современных значений в центре Восточно-Европейской равнины (по [1]; см. рис. 3б); 5–6 – тренды отклонения температур января (серая) и июля (черная) от современных значений для юго-востока Западной Сибири.

тур с учетом известных тенденций изменения климатов в плейстоцене. Анализ этих трендов показывает, что январь в климатические оптимумы в юго-восточной части Западной Сибири в целом становится заметно холоднее и ближе по температуре к современному, при этом отклонения январских температур оказываются примерно равными таковым для Восточно-Европейской равнины. Напротив, отклонения июльских температур чаще выше, т.е. летние сезоны в Западной Сибири становятся более теплыми, чем даже на Восточно-Европейской равнине. В целом это говорит о росте континентальности климата в плейстоценовые межледниковья в районе хранилища. Что касается температур ледниковых стадий, то конкретные значения имеются только по одной из них – Шайтанской. Отклонения и летних, и зимних температур в то время в целевом районе были ниже, чем на Восточно-Европейской равнине. Сами температуры при этом были много ниже, чем в текущем межледниковье. Судя по продвижению на юг границы ледников, температуры в эти эпохи также постепенно понижались. Сокращение площади ледников ближе к современности, возможно, связано с постепенной аридизацией климата Сибири в плейстоцене и изменениями в циркуляции атмосферы из-за подъема горных стран на юге.

Как видим, климаты прошлого в районе будущего хранилища за последние 400 тыс. лет

были много холоднее, чем современный “умеренно холодный”. Исключением были периоды оптимумов межледниковий, когда климат был близок к современному или даже был несколько теплее. Только в прошлом, отдаленном на многие миллионы лет, климат был существенно теплее современного и приближался к “субтропическому”.

Несмотря на то, что большая часть климатов в районе проектируемого хранилища за последние сотни тысяч лет была холоднее, чем в настоящем, а сегодняшний “теплый” период готов смениться новой ледниковой фазой, резкое антропогенное потепление, наблюдаемое за последние 50–100 лет, может существенно повлиять на тренд естественного процесса.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННОГО И БУДУЩИХ КЛИМАТОВ В РЕГИОНЕ ПРОЕКТИРУЕМОГО ХРАНИЛИЩА

Территория будущего хранилища находится в зоне умеренных широт и характеризуется резко континентальным климатом с продолжительной суровой зимой (средняя температура января -21°C) и коротким жарким летом (средняя температура июля $+18.5^{\circ}\text{C}$). Среднегодовая температура воздуха -1°C . Среднегодовое количество осадков составляет около 400 мм; летом выпадает 75% годовой суммы осадков.

Для общей характеристики будущих климатов будет удобно пользоваться известной классификацией В. Кеппена. В основе его классификации лежат средние температуры за определенные месяцы (самого теплого и холодного), средняя годовая температура и осадки (средние месячные и годовые количества). Кроме того, классификация имеет тесную связь с ботанико-географическими районами. Названия типов климата приурочены к определенным ландшафтным зонам (тропический лес, саванна, пустыня и т.д.). Эти качества классификации сделали ее весьма распространенной, в частности среди экологов. В. Кеппен выделил 5 основных типов климата, в которых был выделен ряд подтипов. Основные типы климата характеризуются следующими параметрами.

Тропический дождливый климат. Самый холодный месяц имеет среднюю температуру не ниже $+18^{\circ}\text{C}$. Осадков выпадает много. Данный тип делится на жаркий и влажный климат тропических лесов, климат саванн и климат муссонов.

Тропический сухой климат. Самый теплый месяц имеет среднюю температуру выше $+10^{\circ}\text{C}$. Этот тип подразделяется на климат пустынь и степей.

Умеренно теплый климат. Средняя температура самого холодного месяца от -3°C до $+18^{\circ}\text{C}$. Данный тип делится на теплый климат с сухим летом (берега Средиземного моря), на теплый климат с сухой зимой (Южный Китай) и на влажно-умеренный климат (Франция, Англия и др.).

Умеренно холодный климат. Самый теплый месяц имеет среднюю температуру выше $+10^{\circ}\text{C}$, а самый холодный ниже -3°C . Этот тип делится на климат с сухой зимой (Сибирь) и на климат с влажной зимой (большая часть Восточной Европы).

Снеговой климат. Самый теплый месяц имеет среднюю температуру ниже $+10^{\circ}\text{C}$. Данный тип климата подразделяется на климат тундры с температурой самого теплого месяца выше 0°C (берега Северного Ледовитого океана) и на климат вечного мороза с температурой самого теплого месяца ниже 0°C (Гренландия, Антарктика).

Современный климат района хранилища по своим характеристикам является умеренно холодным с сухой зимой. Однако умеренно холодным климат региона был не всегда, что было показано в предыдущем разделе и, очевидно, не навсегда таким останется.

Рассмотрение сценариев развития глобального климата показало, что в ближайшие сто лет сред-

няя температура атмосферы может превысить современные на несколько градусов (см. рис. 2), а через 1000 лет превышение достигнет 8°C [5]. Большие отклонения, как показывает моделирование и исторические реконструкции, можно ожидать в районах крайнего севера, меньшие – ближе к экватору. Район хранилища находится как раз в средних широтах (56° с.ш.).

В истории этой территории бывали климаты с более высокими среднегодовыми температурами, чем сегодняшние. Прежде всего это казанцевское межледниковье ($\Delta T +2+4^{\circ}\text{C}$) и еще более теплое тобольское межледниковье ($\Delta T +10^{\circ}\text{C}$).

За пределами периода влияния антропогенных выбросов углекислоты следует ожидать наступления очередной ледниковой стадии. Аналогами для характеристик будущих холодных климатов в районе хранилища можно считать климаты прошлых оледенений Западно-Сибирской равнины. Наиболее детальные сведения имеются о сартанской и шайтанской ледниковых стадиях.

Характеристики переходного периода может дать информация по сартанскому послеледниковью.

Климаты межледниковий. Климат последнего межледниковья, известного в Сибири как казанцевское (микулинское в Восточной Европе), соответствует сравнительно небольшому повышению температуры приземного воздуха. Согласно реконструкциям, представленным в работе [12], средние январские температуры (рис. 6 А–Б) в районе Красноярска превышали современные на 6°C , июльские – почти не отличались, а средние годовые температуры отличались от современных примерно на $+2^{\circ}\text{C}$. Температуры много выше современных реконструируются в обширной области средних и высоких широт Сибири. Температура июля в арктической зоне была выше современной на $6-8^{\circ}\text{C}$, а января – на $10-12^{\circ}\text{C}$. Наименьшие (вплоть до отрицательных) отклонения от современных значений имели температуры для территории, расположенной южнее $50-55^{\circ}$ с.ш., т.е. для современных степных и лесостепных областей.

Реконструкции годовой суммы осадков (рис. 6В) показывают, что на всех широтах Сибири осадков выпадало больше, чем в настоящее время, однако прослеживаются и существенные региональные различия. В умеренном поясе внутренних районов Сибири превышения составляли менее 100 мм. Район Красноярска располагался в зоне превышения $+100$ от современной годовой суммы осадков.

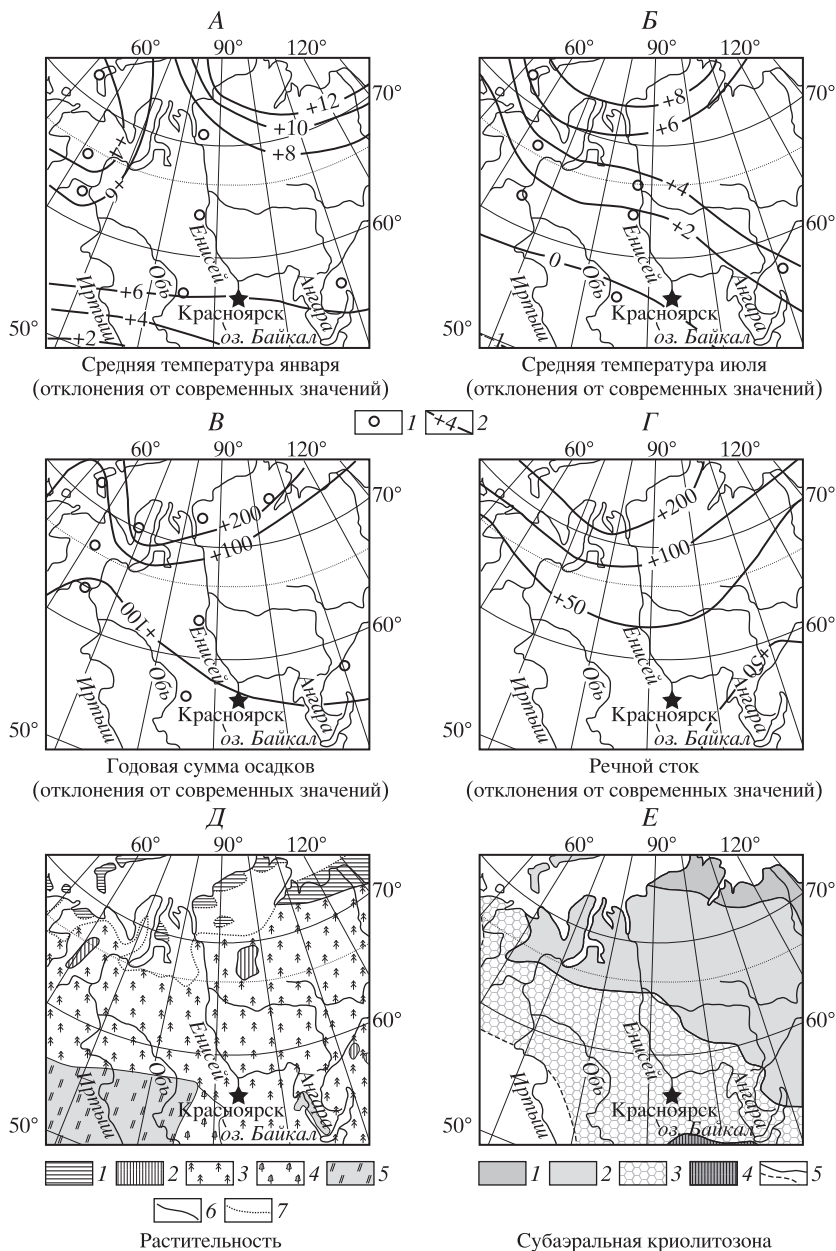


Рис. 6. Ландшафтно-климатическая характеристика последнего межледникового (казанцевский климатический оптимум около 125 000 лет назад). Фрагменты карт из [12].

Условные обозначения: к рис. 6А–Г: 1 – точки фактического материала, 2 – изолинии; к рис. 6Д: 1 – тундра, 2 – альпийские луга и горная тундра, 3 – тайга, 4 – широколиственные леса, 5 – степи, 6 – границы растительных зон, 7 – древняя береговая линия; к рис. 6Е: 1 – зона сплошной многолетней мерзлоты, 2 – зона прерывистой и островной мерзлоты, 3 – зона глубокого сезонного промерзания, 4 – горная мерзлота, 5 – границы интенсивности криолитозоны (сплошные линии) и граница сезонного промерзания (штриховая линия).

Речной сток в районе Красноярска также превышал современные значения на величину до 50 мм (рис. 6Г).

На севере Западной Сибири, примерно до широты Полярного круга, располагался палеобассейн, который был тепловоднее и менее ледовит по сравнению с современным Карским морем. По берегам Казанцевского моря располагались,

сменяя друг друга, южные тундры и лесотундры, а в климатический оптимум – северотаежные леса (рис. 6Д). Южнее, в центральных районах Западно-Сибирской равнины, леса были с южнотаежной (в оптимум) растительностью с примесью широколиственных пород (дуб, орешник). В оптимум казанцевского межледникового темной хвойной растительности средней и южной тайги

далеко продвигалась на север, занимая современную территорию лесотундры. Арктической растительности, характерной для современной лесотундровой зоны, не существовало. Граница леса практически совпадала с береговой линией моря. В центральных районах и севернее формировались луговые, торфяно-глеевые и болотные почвы. В южной половине Западной Сибири господствовали лесостепные ландшафты. Их граница по сравнению с современной значительно смещалась на север, а на юге – смещалась за счет редукции степной зоны. Почвенный покров этих районов был представлен более гумидными, чем современные черноземными почвами [4].

Карта на рис. 6Е показывает общую структуру субэкральной криолитозоны этого времени при глобальном потеплении примерно на 1,8–2 °С по сравнению с современностью. Сплошная многолетняя криолитозона сохранялась только на крайнем севере. Сохранялась также зона горной мерзлоты на 5–6° южнее Красноярска (Алтай – Саяны). Ширина полосы не сплошной (прерывистой, островной) многолетней криолитозоны, напротив, значительно возрастала. Северная граница островной многолетней мерзлоты в Западной Сибири по Оби и Енисею располагалась практически за полярным кругом. Восточнее Ангары она опускалась до Байкала. Ее южная граница сдвигалась к северу на несколько сотен километров по сравнению с современным положением [12].

В целом, в казанцевское межледниковье климат был теплее и гумиднее, чем современный. Но по своим характеристикам он относится к типу умеренно холодного климата, вероятно с более влажной зимой. Более теплым в Сибири было тобольское межледниковье (380–270 тыс. л.н.). Оно было одним из самых продолжительных и может быть аналогом для климата с более сильным разогревом атмосферы в связи с ростом выбросов парниковых газов. Среднегодовые температуры были выше современных на 10 °С. Зимние сезоны были короче и теплее современных почти на 7–9 °С; летние сезоны были продолжительнее, более влажные и умеренно теплые [4].

В это время север равнины заливался морской трансгрессией. Обско-туруханский бассейн по сравнению с современными Баренцевым и Карским морем был несколько тепловодней. На суше существовала хорошо развитая речная сеть. В таежной области, простиравшейся на север до побережья моря у 64–65° с.ш. шло торфонакопление. В южных районах отмечено интенсивное

формирование почв черноземного ряда. В среднем течении Енисея в начале межледниковья существовали хвойные еловые леса с большим участием березы, примесью сосны, кедра и пихты, с обилием папоротников, лесных плаунов и луговой растительностью. Затем, возможно, где-то в средней части межледникового периода, тайга уступила место березовым лесам с примесью ели и обильным травянистым покровом. Изменение в составе лесов связывают с некоторым иссушением климата в климатический оптимум. В целом, в тобольский климатический оптимум среднетаежные леса смещались к северу примерно до широты 65° с.ш. и произрастали вдоль побережий обского (туруханского) моря. Центральные районы Западно-Сибирской равнины до широты Тюмени и Томска были заняты южной тайгой, а далее к югу простирались широтно вытянутые зоны лесостепи и степи, границы которых также были сдвинуты на 3–4° к северу от современных [4].

Тем не менее, и такой климат по классификации Кеппена следует относить к умеренно холодным с влажной зимой, что сближает его с климатом Восточной Европы. Криолитозона в таком климате не сохраняется в средних широтах даже в реликтах.

Климаты ледниковий. Последняя зырянская ледниковая эпоха (валдайская в Европе) началась около 117 тыс. лет назад после казанцевского межледниковья. В конце этой ледниковой эпохи (сартанское оледенение) из-за особенностей циркуляции атмосферы создались условия для разрастания ледников западного сектора Евразии, а в Сибири и на Северо-Востоке, наоборот, происходило уменьшение размеров ледниковых покровов [12].

Фаза сартанского оледенения началась с активной экспансии ледниковых покровов около 25–23 тыс. лет назад. Максимум похолодания на территории Западной Сибири пришелся на период 20–18 тыс. лет назад. Для этого времени существует несколько вариантов реконструкции. Одна из них представлена на рис. 7. Ледниковый покров в Сибири не распространялся южнее 75° с.ш. (Новая Земля). Горно-долинное оледенение развивалось в горных массивах северных континентальных районов Сибири и Урала, а также в южных горных системах, в частности в Алтае-Саянской горной области. Многолетняя субэкральная криолитозона при этом занимала огромные пространства Северного полушария вплоть до 45–47° с.ш. континентов. Ее мощность в районе Красноярска достигала 600 м [12].

Данные по историческим температурам для этой ледниковой стадии отсутствуют. Для более ранней шайтанской стадии оледенения июльские температуры были на 4–6 °С ниже современных, январские опускались до –29 (ΔТ –8 °С), а среднегодовая температура была ниже современной на 7–8 °С [4].

Климат ледниковых стадий в Сибири и в районе размещения хранилища однозначно можно классифицировать как снеговой тундровый. Шайтанский ледниковый покров, опускавшийся до 62–64° с.ш. (устье Иртыша – север Енисейского кряжа), вызывал подпрудные явления на реках, инициируя возникновение подпрудно-ледниковых бассейнов. Лишь южные приподнятые равнины не заливались, и в их пределах шла субаэральная аккумуляция лёссовых покровов [4].

Переходные климаты. Сартанское позднеледниковье (от 13 до 10 тыс. лет назад) дает единственный и уникальный по Сибири материал для суждения о динамике изменений климата и ландшафтов в переходный период от ледниковья к межледниковью. В течение всего 3 тыс. лет в центральных и, отчасти, южных районах Западно-Сибирской равнины, где в сартанское ледниковье существовали тундровые и лесотундровые ландшафты, дважды и исключительно быстро (в течение несколько сотен лет) расселялась тайга, которая также неожиданно и погибала. Только начиная с рубежа в 9 тыс. лет произошло становление современной растительной зональности. Очевидно, что смена климатов – время, чрезвычайно насыщенное резкими ландшафтно-климатическими перестройками [4].

С началом потепления в конце сартанского ледниковья начинается процесс деградации криолитозоны. Уже примерно 12 тыс. лет назад южная граница сплошной многолетней мерзлоты в Западной Сибири отступает примерно к широте Полярного круга. Темпы отступления этой границы составили в среднем около 400 км за столетие. Такие быстрые темпы отступления мерзлоты способствовали интенсивному таянию подземных льдов. Активные термокарстовые процессы привели к заметному нарушению прочности литогенной основы ландшафтов, началу формирования реликтового криогенного микрорельефа. В конечном итоге это привело к заметным деформациям земной поверхности, усилению эрозионных процессов как в пределах обширных водоразделов, так и в речных долинах, способствовало мозаичности почвенного покрова [12].

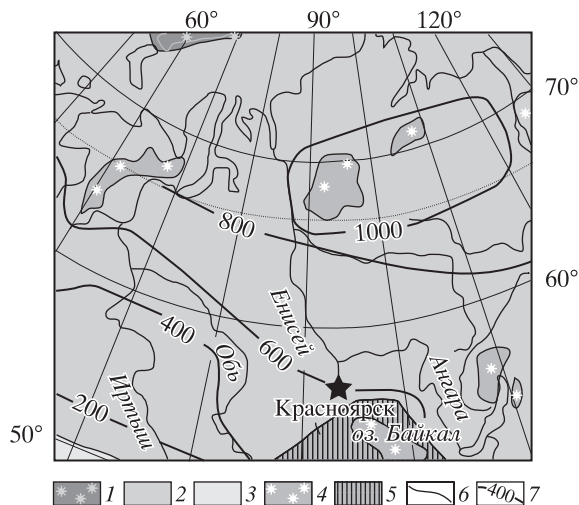


Рис. 7. Оледенение и многолетняя мерзлота в период максимального похолодания позднего плейстоцена в Сибири (Сартанское оледенение, около 20–18 тыс. лет назад). Фрагмент карты из [12]: 1 – ледниковые покровы; 2 – зона сплошной многолетней мерзлоты; 3 – зона прерывистой и островной мерзлоты; 4 – горные ледниковые покровы; 5 – зоны горной мерзлоты; 6 – границы интенсивности криолитозоны; 7 – изолинии мощности криолитозоны.

Применительно к модели будущей биосферы (если повернуть процессы вспять к оледенению) время смены климата с умеренно холодного на снеговой следует выделять в особую стадию. Общее похолодание климата будет сопровождаться экстремальными климатическими изменениями, частой сменой развития оледенений и многолетней мерзлоты и коротких периодов потепления.

ВЫВОДЫ

Неопределенности в долгосрочном прогнозе будущих климатов связаны как с недостатками в понимании природы периодических изменений климатов прошлого, так и с нелинейной динамикой самих климатических процессов. В результате современные прогностические модели климата имеют горизонт прогноза, ограниченный первыми сотнями лет.

Учитывая практическую потребность в предсказании климатов гораздо более отдаленного будущего в связи с обоснованием безопасности хранилища ВАО, проектируемого в Красноярском крае, предложена методика использования для этой цели климатов-аналогов из числа палеоклиматов данного региона.

Показано, что сравнительно краткосрочный математический прогноз климата на XXI в. в условиях роста температур на 1–3 °С и палео-

климатические аналоги более теплых (на 2 °С относительно современности) периодов, взятые из реконструкций ландшафтно-климатических условий в прошлые межледниковья, дают схожие тренды. В случае такого потепления наибольшее повышение приземной температуры в Сибири будет наблюдаться в зимнее время. Рост осадков также ожидается преимущественно в зимнее время года и в основном в северных регионах Сибири. Рост осадков зимой приведет к заметному увеличению стока на водосборе Енисея с апреля по май. Потепление климата в Сибири приведет к значительному увеличению глубины протаивания многолетнемерзлых грунтов, особенно у их южной границы. Север Западной Сибири будет затоплен из-за поднятия уровня моря, возможно, южнее широты Полярного круга. В районе Красноярска в таежных лесах появится примесь широколиственных пород. В долине Енисея будут формироваться луговые, торфяно-глеевые и болотные почвы. В случае повышения среднегодовых температур на 10 °С изменение климатических условий сохранит те же тенденции, но климат принципиально не изменится и останется в пределах умеренно холодной зоны, правда зима будет более влажной.

Климат ледниковой эпохи в районе Красноярска со среднегодовой температурой ниже современной на 7–8 °С, который наступит через несколько тысяч лет, однозначно будет гораздо более суровый, чем сегодня, и его можно классифицировать как снеговой тундровой. Глубина многолетнемерзлых грунтов в районе Красноярска может достигнуть 600 м.

При создании модели радиационного воздействия на критическую группу населения для проектируемого объекта окончательной изоляции ВАО на участке Енисейский следует учитывать, по крайней мере, два принципиально различных будущих состояния климатической системы в регионе – умеренно холодная зона с влажной зимой и снеговая тундровая зона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Величко А.А.* Становление современной ландшафтной оболочки Земли // *Природа*. 2012. № 1. С. 78–87.
2. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности. № SSR-5 // Вена: МАГАТЭ, 2007. 104 с.
3. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-04. М.: Ростехнадзор, 2004. 21 с.
4. Изменение климата и ландшафтов за последние 65 миллионов лет (кайнозой: от палеоцена до голоцена). М.: ГЕОС, 1999. 260 с.
5. Изменения климата, 2007 г. Обобщающий доклад. Женева: МГЭИК, 2007. 104 с.
6. *Кочкин Б.Т.* Принцип консерватизма в оценке безопасности могильников высокорadioактивных отходов // *Геоэкология*. 2012. № 5. С. 436–448.
7. *Кочкин Б.Т.* Обоснование долгосрочной безопасности геологических хранилищ высокорadioактивных отходов // *Геоэкология*. 2013. № 4. С. 342–352.
8. *Мальковский В.И., Пэк А.А., Кочкин Б.Т., Озерский А.Ю.* Оценка потенциального загрязнения геологической среды при подземном захоронении радиоактивных отходов на участке Енисейский Нижнеканского массива (Красноярский край) // *Геоэкология*. 2013. № 6. С. 485–492.
9. *Мелешко В.П., Голицын Г.С., Говоркова В.А. и др.* Возможные антропогенные изменения климата России в XXI веке: оценки по ансамблю климатических моделей // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 4. С. 38–49.
10. *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.: ГОНТИ, 1939. 207 с.
11. Результаты исследований изменений климата для стратегий устойчивого развития Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2006. 180 с.
12. Палеоклимат и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен – голоцен. Атлас-монография. М.: ГЕОС, 2009. 120 с.
13. *Хаин В.Е., Халилов Э.Н.* Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа. М.: Научный мир, 2009. 520 с.
14. BIOCLIM, Deliverable D7: Continuous climate evolution scenarios over western Europe (1000km scale). Published by ANDRA, 2003. (www.andra.fr).
15. *Fischer H., Wahlen M., Smith J. et al.* Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations // *Science*. 1999. № 283. P. 1712–1714.
16. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. Paris: OECD/NEA Publishing, 2012. 242 p.
17. “Reference Biospheres” for solid radioactive waste disposal. Report IAEA-BIOMASS-6. Vienna: IAEA, 2003. 106 p.

**LONG-TERM FORECAST OF CLIMATE CHANGES
IN THE LOCATION AREA OF REPOSITORY FOR HIGH-LEVEL
RADIOACTIVE WASTES
(Yeniseysky site, the Krasnoyarsk region)**

B. T. Kochkin

*Institute of geology of ore deposits, petrography, mineralogy and geochemistry,
Russian Academy of Sciences (IGEM RAS),
Staromonetny per. 35, Moscow, 119017 Russia. E-mail: btk@igem.ru*

The article proposes the decision on the justification of long-term climate variability in the region of the planned geological repository for high-level radioactive wastes in the vicinity of Zheleznogorsk (the south of Krasnoyarsk region). The author examines the results of instrumental observations of the climate of the Northern hemisphere, the trends in its variability, the uncertainties in the results of modern prognostic models of global climate, as well as the available geological data about past climates of the repository district. The decision consists in selecting past geological climate analogues, which meet the main trends in the evolution of the upcoming climates. The article characterizes the main landscape-climatic conditions in the repository region for different periods of the distant future.

Keywords: *high-level radioactive wastes, geological repository, safety assessment, climate long-term prediction.*