

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.34:551.58

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ ПРОГНОЗА ИЗМЕНЕНИЯ РАЗМЕРОВ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР
НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

Ю.М. Полищук^{1,2}, В.Ю. Полищук³

¹*Институт химии нефти СО РАН, 634021, Томск, просп. Академический, 4, Россия; yupolishchuk@gmail.com*

²*Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий,
628011, Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151, Россия*

³*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
634021, Томск, просп. Академический, 8, Россия; yu_polishchuk@gmail.com*

Представлены результаты математического моделирования и прогнозирования динамики полей термокарстовых озер на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири до конца нынешнего столетия. Описана геоимитационно-регрессионная модель динамики термокарстово-озерных полей, свойства которой определены на основе статистического распределения координат местоположения и площадей озер, полученных экспериментальным путем с использованием разновременных космических снимков Landsat за период 1973–2009 гг. В модели учтена взаимосвязь термокарстово-озерных и климатических изменений, установленная на основе многомерного регрессионного анализа экспериментальных данных. Прогнозирование динамики полей термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири осуществлено с помощью компьютерных экспериментов на модели с учетом известных прогнозов изменения среднегодовой температуры для исследуемой территории. Показано, что повышение температуры будет сопровождаться сокращением площади термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири.

Термокарстовые озера, глобальное потепление, геоимитационное моделирование, прогноз, дистанционное зондирование, многолетняя мерзлота, Западная Сибирь

**USING OF GEO-SIMULATION FOR FORECASTING THE CHANGES
IN SIZES OF THERMOKARST LAKES IN NORTHERN WEST SIBERIA**

Yu.M. Polishchuk^{1,2}, V.Yu. Polishchuk³

¹*Institute of Petroleum Chemistry, 634021, Tomsk, Akademicheskyy str., 4, Russia; yupolishchuk@gmail.com*

²*Ugra Research Institute of Information Technologies, 628011, Khanty-Mansiysk, Mira str., 151, Russia*

³*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS,
634021, Tomsk, Akademicheskyy str., 8, Russia; yu_polishchuk@gmail.com*

Results of mathematical modeling and forecasting of the dynamics of thermokarst lake fields in West-Siberian permafrost up to the end of the century are presented. The geoimitation-regression model of the dynamics of thermokarst lake fields is described. Properties of the model are determined on the basis of statistical distribution of coordinates and sizes of lakes, obtained experimentally using the Landsat space images during the period of 1973–2009. The model takes into account the relationship between thermokarst and climate changes, established on the basis of multivariate regression analysis of the experimental data. Prediction of the dynamics of thermokarst lake fields in West-Siberian permafrost has been completed with the help of computer experiments based on the model taking on account of the known forecasts of changes in mean annual temperature for the study area. It is demonstrated that an increase in temperature will be accompanied by a decrease in the sizes of thermokarst lakes in the permafrost of West Siberia.

Thermokarst lakes, global warming, geoinformation modeling, forecast, remote sensing data, permafrost, West Siberia

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что потепление климата приводит на северных территориях к росту аварийности на трубопроводах и других сооружениях нефтегазо-

вого комплекса. Снижение прочности многолетне-мерзлых пород, вызываемое ускорением термокарстовых процессов под воздействием потепле-

ния, сопровождается ростом экономических и экологических ущербов на предприятиях отечественного нефтегазового комплекса, так как большинство газовых месторождений и значительная часть месторождений нефти в Западной Сибири располагаются в зоне вечной мерзлоты. Разработка мероприятий по снижению ущербов нефтегазодобывающих предприятий невозможна без прогнозных оценок динамики морфологической структуры озерно-термокарстовых равнин [Викторов, 2006]. Для получения этих оценок необходимо использовать математическое моделирование динамики термокарстовых процессов на территории вечной мерзлоты в условиях климатических изменений.

Вследствие высокой степени заболоченности и труднодоступности территории многолетней мерзлоты эти исследования как в нашей стране, так и за рубежом проводятся с применением данных дистанционного зондирования. При этом в качестве наиболее пригодных геоморфологических индикаторов изменений многолетней мерзлоты под воздействием потепления климата используются хорошо дешифрируемые на космических снимках термокарстовые озера [Днепровская и др., 2009; Кравцова, 2009]. Поэтому важными представляются вопросы прогнозирования изменения размеров термокарстовых озер.

В наших работах [Полищук Ю.М., Полищук В.Ю., 2011а,б] разработана модель полей термокарстовых озер, позволяющая учитывать важную закономерность динамики этих полей (сокращение площадей термокарстовых озер в зоне мерзлоты со временем), подтверждаемую в большом числе дистанционных исследований, например, [Кирпотин и др., 2008; Кравцова, Тарасенко, 2010]. На основе этой модели нами [Полищук В.Ю., Полищук Ю.М., 2013] дан прогноз изменений площадей термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири до 2300 г. с использованием материалов о среднегодовой температуре воздуха, полученных путем линейной экстраполяции данных реанализа.

Однако, как показали прогнозные оценки температурных изменений для севера Западной Сибири до 2300 г. [Клименко и др., 2007; Хрусталев и др., 2008], тренд временного хода среднегодовых значений температуры в долгосрочной перспективе отличается от линейного вида. Поэтому представляется интересным провести прогнозирование изменений полей термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири до 2100 г. с использованием прогнозных оценок температурных изменений, полученных В.В. Клименко с соавторами [Клименко и др., 2007; Хрусталев и др., 2008], что и стало целью настоящей работы.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГЕОИМИТАЦИОННО-РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ПОЛЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР И ЕЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Модель полей термокарстовых озер, пригодная для прогнозирования их динамики, разработана с использованием геоимитационного подхода в наших публикациях [Полищук Ю.М., Полищук В.Ю., 2011б]. Основные свойства модели определены эмпирическим путем на основе анализа данных дистанционных исследований. Экспериментальные исследования проводились в зоне мерзлоты Западной Сибири, где были выбраны 29 тестовых участков (ТУ), схема расположения которых дана на рис. 1. Для проведения исследований использовано 106 безоблачных космических снимков Landsat за период 1973–2009 гг. Результаты этих исследований подробно изложены в статье [Polishchuk V., Polishchuk Yu., 2014].

Нами [Полищук Ю.М., Полищук В.Ю., 2012] на основе анализа экспериментальных данных показано, что в качестве формы береговых границ моделируемых термокарстовых озер можно выбрать окружность. В связи с этим модель пространственной структуры, предложенная в статье [Полищук Ю.М., Полищук В.Ю., 2011а], представляет собой совокупность случайных окружностей, каждая из которых отображает в модели отдельное термокарстовое озеро. Анализ гистограмм распределения координат центров озер на плоскости показал [Там же], что экспериментальные законы распределения координат центров озер по критерию χ^2 с вероятностью 95 % [Кремер, 2003] соответствуют закону равномерной плотности. Согласно данным [Полищук Ю.М., Полищук В.Ю., 2011а; Polishchuk V., Polishchuk Yu., 2014], термокарстовые озера распределены по их площадям в соответствии с экспоненциальным законом рас-

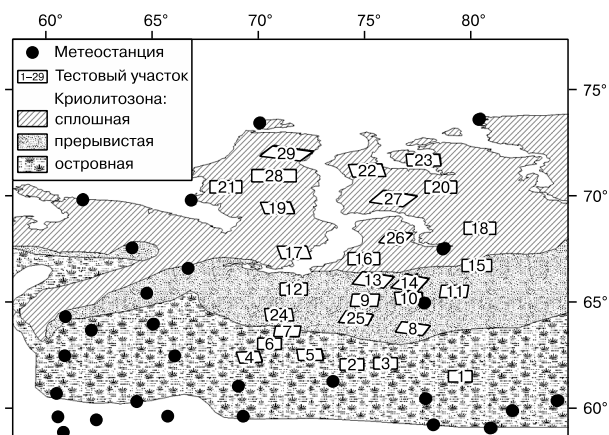


Рис. 1. Карта-схема расположения тестовых участков и сети метеостанций.

пределения. Поэтому распределение окружностей по площадям в модели также будет подчиняться экспоненциальному закону с плотностью вероятностей в виде

$$f(s) = \lambda e^{-\lambda s}, \quad (1)$$

где λ – параметр распределения; s – площадь озер.

Для моделирования динамики полей озер важно выявление зависимости параметра λ от климатических показателей. Для изучения взаимосвязи климатических и геокриологических изменений необходимо совпадение местоположения (или, по крайней мере, близкое расположение) метеостанций и тестовых участков. Рассматривая картосхему расположения метеостанций на исследуемой территории, совмещенную со схемой расположения тестовых участков (см. рис. 1), видим, что метеостанции и тестовые участки, как правило, не совпадают по местоположению. Действительно, на труднодоступных территориях многолетней мерзлоты метеостанции обычно располагаются по берегам рек или в населенных пунктах, а термокарстовые озера – в местах активного термокарста. Такое расхождение местоположений тестовых участков и метеостанций может стать причиной значительных погрешностей в выявлении взаимосвязи климатических и геокриологических изменений на исследуемой территории. Поэтому проведенное нами [Полищук В.Ю., Полищук Ю.М., 2013] исследование, направленное на определение взаимосвязи изменений площадей термокарстовых озер и климатических показателей (среднегодовой температуры воздуха и уровня осадков), потребовало получения данных о температуре и уровне осадков с использованием методики реанализа, позволяющей определить значения климатических показателей в местах расположения ТУ.

Реанализ (повторный метеорологический анализ [Meteorological reanalysis, 2011]) позволяет получить метеорологическую информацию в заданных пунктах исследуемой территории. Основная идея реанализа заключается в том, что на базе анализа накопленных за период нескольких десятилетий данных различных архивов метеорологических наблюдений формируются наборы метеоданных, которые представляются в виде полей метеорологических показателей, что позволяет определить климатические характеристики в местах расположения ТУ. Существуют различные проекты систем реанализа [APHRODITE's SCOPE, 2011; European Center..., 2011]. В настоящей работе для определения климатических характеристик использовались данные проектов Reanalysis ECMWF ERA-40, ERA-INTERIM и APHRODITE JMA.

С использованием данных реанализа в монографии [Полищук В.Ю., Полищук Ю.М., 2013] были сформированы таблицы данных о среднегодовой

температуре воздуха и годовой сумме осадков за исследуемый период на выбранных тестовых участках. Эти сведения стали основой для проведения статистического анализа с целью определения зависимости параметра λ от времени и климатических показателей в виде уравнения множественной линейной регрессии [Кремер, 2003]:

$$\lambda = c_0 + c_1 z_1 + c_2 z_2 + c_3 z_3, \quad (2)$$

где c_0 – свободный член уравнения регрессии; c_i – коэффициенты уравнения регрессии; z_i – независимые переменные уравнения регрессии: время ($i = 1$), температура ($i = 2$), осадки ($i = 3$).

Заметим, что кроме изменений климатических показателей на величину параметра λ оказывают влияние и различия геокриологических условий на разных ТУ. Однако регрессионное уравнение (2) описывает поведение параметра λ не на отдельных участках, а в среднем для совокупности исследованных тестовых участков, отображая общие для них закономерные взаимосвязи параметра λ с климатическими характеристиками.

Ниже приведены следующие основные положения, которые, согласно данным [Полищук В.Ю., Полищук Ю.М., 2013], определяют существенные свойства геоимитационно-регрессионной модели пространственно-временной структуры полей термокарстовых озер:

- 1) формы береговых границ озер представляются уравнением окружности с координатами центров x_i, y_i и площадью s_i (i – номер окружности);
- 2) пространственные изменения координат центров окружностей и их площадей статистически независимы;
- 3) случайное распределение каждой из координат окружностей x_i, y_i определяется законом равномерной плотности;
- 4) случайное распределение числа окружностей по их площадям определяется показательным законом распределения в виде (1) с параметром λ ;
- 5) зависимость статистических свойств модели динамики поля термокарстовых озер от времени, температуры и осадков рассчитывается по уравнению (2).

В связи с вышеизложенным общая модель динамики полей термокарстовых озер, описывающая пространственно-временные изменения этих полей, представляется в виде совокупности (временной последовательности) частных геоимитационных моделей пространственной структуры поля озер, предложенных нами [Полищук Ю.М., Полищук В.Ю., 2011б]. Так как зависимость свойств общей модели от времени и климатических параметров определяется регрессионным уравнением, будем далее для краткости называть рассматриваемую здесь модель динамики полей термокарстовых озер геоимитационно-регрессионной моделью (ГИРМ).

2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ ОСАДКОВ НА ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Согласно уравнению (2), параметр модели λ зависит от времени, температуры и уровня осадков. Для получения прогнозных оценок динамики полей термокарстовых озер в зоне мерзлоты до 2100 г. можно использовать региональные ряды среднегодовых температур для севера Западной Сибири, представленные В.В. Клименко с соавторами [Клименко и др., 2007; Хрусталева и др., 2008]. Но, к сожалению, прогнозов изменения уровня осадков для Западной Сибири на период до 2100 г., насколько нам известно, в настоящее время в литературе нет. Поэтому важным для прогнозирования динамики полей термокарстовых озер в условиях климатических изменений является исследование существенности влияния уровня осадков на результаты прогнозирования изменений термокарстовых процессов, для чего проведем сравнение результатов прогнозирования динамики полей термокарстовых озер, полученных на основе использования геоимитационно-регрессионной модели как с учетом, так и без учета уровня осадков.

Прежде рассмотрим результаты анализа и прогноза изменений температуры, выполненные в Главной геофизической обсерватории (ГГО) им. А.И. Воейкова [Стратегический прогноз..., 2005] и приведенные на рис. 2 в виде графика временного хода приземной температуры воздуха на территории России, рассчитанного по ансамблю гидродинамических моделей климата при различных сценариях развития глобальной экономики до 2030 г. Согласно работе [Стратегический прогноз..., 2005], эти данные в среднем согласуются с прогнозными оценками Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, IPCC) [Изменение климата, 2007]. Как видно из рис. 2, значения температуры в прогнозный период 2000–2030 гг. в среднем соответствуют экстраполяции линейного тренда временного хода температуры, полученного в предшествующий период наблюдений (1970–2000 гг.). Известно [Четыркин, 1977], что экстраполяция временных рядов, т. е. продление в будущее тенденции, наблюдавшейся в прошлом, является одним из наиболее распространенных методов прогнозирования. Экстраполяция тенденций динамических рядов сравнительно широко применяется в практике прогнозирования в силу ее простоты и возможности осуществления на основе относительно небольшого объема информации.

Поэтому по аналогии с работой [Стратегический прогноз..., 2005] для определения прогнозных значений температуры и уровня осадков при моделировании динамики термокарстовых озер до

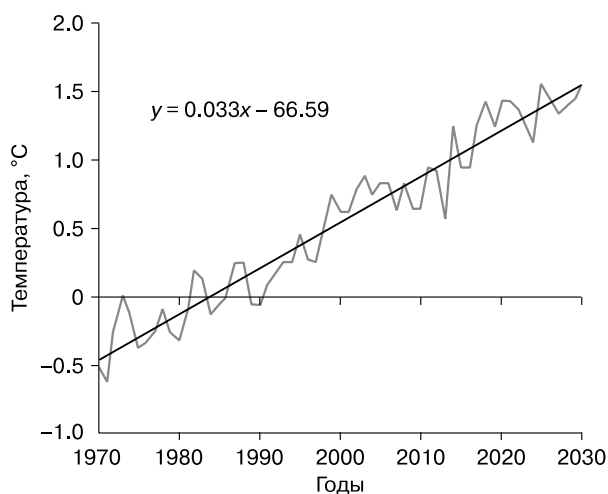


Рис. 2. Прогнозируемый рост температуры приземного воздуха для России на период 2000–2030 гг. (по данным [Стратегический прогноз..., 2005]).

2030 г. будем использовать экстраполяцию линейных трендов временных рядов среднегодовой температуры и годовой суммы осадков, полученных по данным реанализа для исследуемой территории мерзлоты Западной Сибири. Прогнозирование динамики полей термокарстовых озер проводилось путем компьютерного эксперимента на модели в соответствии со следующим сценарием.

Сценарий 1. Прогнозирование динамики полей термокарстовых озер на основе геоимитационно-регрессионной модели и экстраполяции линейных трендов изменений температуры и осадков на период 2010–2030 гг.

Данный сценарий предполагает использование временных рядов среднегодовой температуры приземного воздуха и годовой суммы осадков, сформированных с помощью систем реанализа ERA-40 и APHRODITE JMA соответственно. Процедура получения данных об изменении температуры и уровня осадков на основе реанализа более подробно изложена в монографии [Полищук В.Ю., Полищук Ю.М., 2013]. На рис. 3 и 4 показана экстраполяция линейных трендов временных рядов указанных климатических показателей, полученных по данным реанализа для территории мерзлоты Западной Сибири.

С использованием прогнозных оценок температуры и уровня осадков для каждого тестового участка (см. рис. 1) рассчитывались в соответствии с формулой (2) значения параметра λ для периода 1973–2030 гг. Затем полученные значения параметра усреднялись по всем 29 тестовым участкам исследуемой территории мерзлоты Западной Сибири.

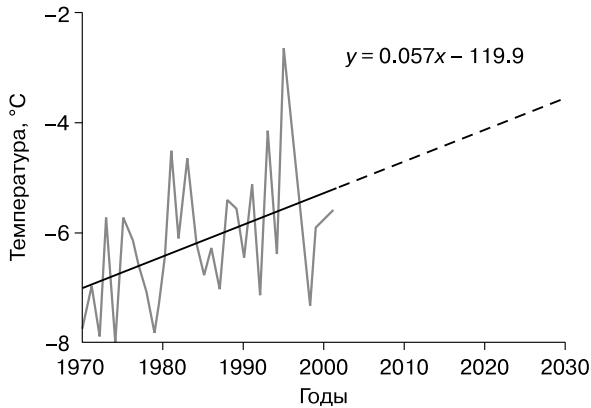


Рис. 3. Экстраполяция линейного тренда временного ряда среднегодовой температуры воздуха по данным реанализа для Западной Сибири.

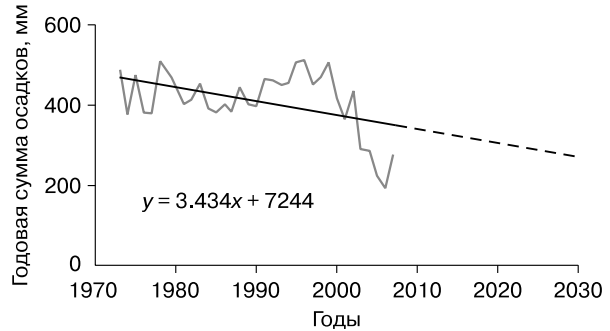


Рис. 4. Экстраполяция линейного тренда временного ряда годовой суммы осадков по данным реанализа для Западной Сибири.

В соответствии со сценарием 1 моделирование динамики полей термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири на период с 2010 по 2030 г. осуществлялось в виде компьютерных экспериментов с ГИРМ на 29 модельных участках, координаты расположения которых соответствуют местоположению реальных тестовых участков (см. рис. 1). Методические вопросы, алгоритмы и программное обеспечение моделирования динамики полей озер достаточно подробно рассмотрены В.Ю. Полищук, Ю.М. Полищук [2013].

Численное моделирование динамики полей термокарстовых озер предполагает компьютерное генерирование совокупностей троек псевдослучайных чисел (x, y, s), отображающих соответственно значения координат центров окружностей и их площади. Согласно вышеизложенному, статистическое распределение координат центров окружностей соответствует закону равномерной плотности, а распределение площадей окружностей – экспоненциальному закону в виде (1) с параметром λ , позволяющим учитывать в модели климатические изменения.

Результатом моделирования является изображение модельного поля озер на отдельных модельных участках. Фрагмент такого изображения приведен на рис. 5. Для изучения динамики полей термокарстовых озер формируются совокупности изображений модельных полей для разных моментов времени, представляющие собой временные последовательности изображений полей озер. Примеры таких последовательностей изображений модельных полей даны в графическом виде в наших работах [Полищук В.Ю., Полищук Ю.М., 2013; Polishchuk V., Polishchuk Yu., 2014].

Обработка и анализ изображений модельных полей осуществляются аналогично обработке спутниковых снимков. При этом рассчитываются площади смоделированных окружностей и определяются для каждого модельного участка суммарные площади модельных озер, средние значения площади озер, гистограммы распределения модельных озер по площадям и др.

Результаты прогнозирования динамики полей термокарстовых озер в зоне мерзлоты Западной Сибири на период 2010–2030 гг., полученные путем моделирования полей термокарстовых озер на основе ГИРМ с учетом экстраполяции линейных трендов среднегодовой температуры и годовой суммы осадков, представлены на рис. 6 (черные точки, соединенные между собой отрезками прямых линий, – средние значения площадей озер, сплошная линия – полиномиальный тренд временного ряда). Интервал предсказания (см. штриховые линии на рис. 6), здесь и далее рассчитанный с вероятностью 95 % с использованием пакета прикладных программ STATISTICA [Буколов, 2004]. Согласно работе [Доверительные

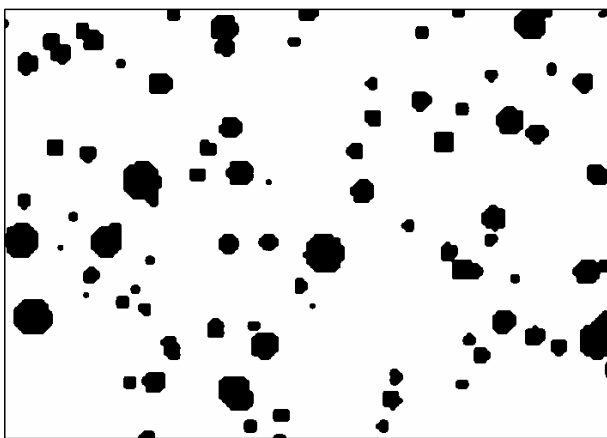


Рис. 5. Фрагмент модельного поля термокарстовых озер.

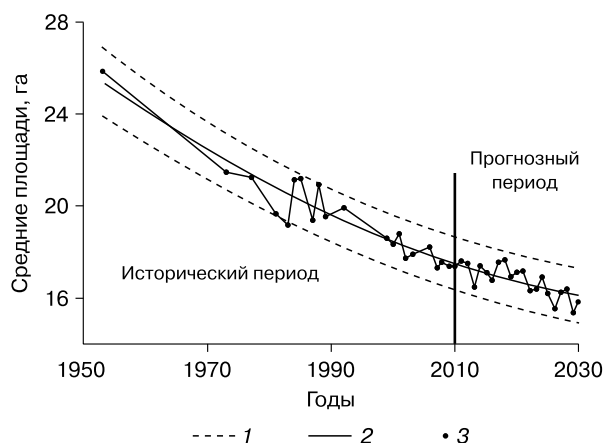


Рис. 6. Временной ход модельных средних значений площадей озер.

1 – граница интервала предсказания; 2 – линия тренда; 3 – модельные средние значения площадей озер.

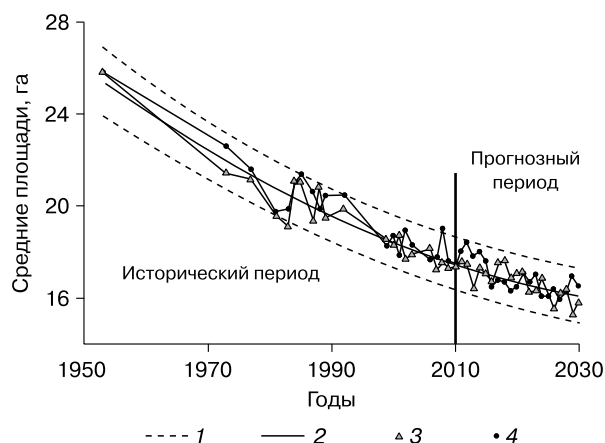


Рис. 7. Сравнение прогнозных временных ходов средних площадей термокарстовых озер с учетом и без учета осадков.

1 – граница интервала предсказания; 2 – линия тренда; 3 – модельные значения с учетом осадков; 4 – модельные значения без учета осадков.

интервалы..., 2011], в отличие от доверительного интервала, который предоставляет информацию об ожидаемом (среднем) значении зависимой переменной, интервалы предсказания экстраполяции показывают пределы изменения прогнозных значений, рассчитанные с заданной достоверностью. Интервал предсказания для прогнозируемого значения зависимой переменной указывает диапазон возможных значений, расположенных в окрестности “истинного” среднего зависимой переменной с заданным уровнем доверия [Доверительные интервалы..., 2011].

Определение существенности влияния осадков на результаты прогнозирования динамики полей термокарстовых озер проводилось путем сравнения данных моделирования динамики полей озер как с учетом, так и без учета осадков. Результаты прогнозирования средних значений площадей озер в прогнозный период без учета осадков отображены на рис. 7 (черные точки, соединенными отрезками прямых линий). Для сравнения на этом рисунке приведен график временного хода средних площадей термокарстовых озер с учетом осадков (треугольники), представленный выше на рис. 6.

Прогнозные графики (см. рис. 7) временных ходов средних площадей озер, определенные как с учетом осадков, так и без их учета, в среднем практически совпадают. Это является основанием для заключения о несущественности вклада изменений уровня осадков в результаты прогнозирования динамики полей термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири по сравнению с вкладом изменений среднегодовой температуры. Следовательно, в дальнейшем при прогнозировании динамики площадей озер на период до 2100 г.

можно пренебречь влиянием осадков, принимая в расчет только температурные изменения.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ ПЛОЩАДЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР ДО 2100 Г.

Для формирования прогноза динамики полей термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири до конца нынешнего века необходимо иметь прогнозные данные по климатическим изменениям на исследуемой территории. Данные прогноза температуры для севера Западной Сибири до 2300 г. представлены в работах [Клименко и др., 2007; Хрусталева и др., 2008], а прогнозов изменений уровня осадков на период до 2100 г., согласно вышеизложенному, в литературе не имеется. Как показано в предыдущем разделе, при прогнозировании динамики термокарстовых процессов в зоне мерзлоты Западной Сибири можно пренебречь влиянием изменения уровня осадков и учитывать только температурные изменения. Поэтому в данном разделе прогнозирование динамики полей термокарстовых озер проводится с использованием данных прогноза среднегодовой температуры для севера Западной Сибири [Хрусталева и др., 2008] на основе компьютерных экспериментов с ГИРМ в соответствии со сценарием 2.

Сценарий 2. Прогнозирование динамики полей термокарстовых озер на основе ГИРМ с использованием прогнозных оценок температурных изменений на севере Западной Сибири на период до 2100 г.

На рис. 8 представлен заимствованный из публикации Л.Н. Хрусталева с соавторами [2008]

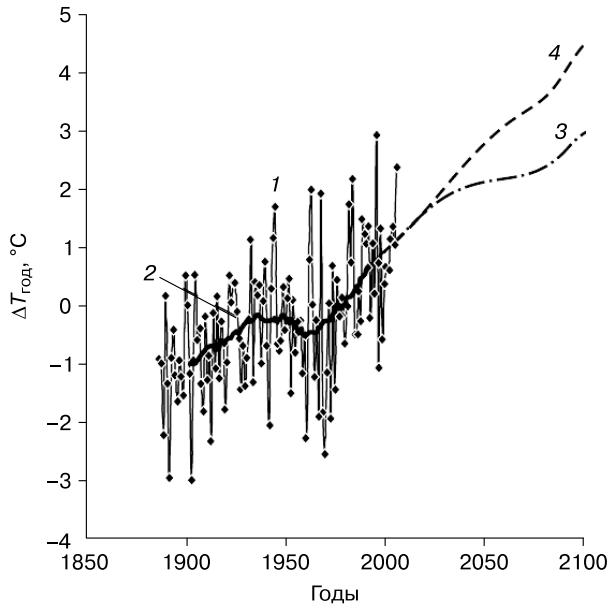


Рис. 8. Изменение среднегодовой температуры воздуха в районе г. Сургут (в отклонениях от среднего значения за 1951–1980 гг.), по данным [Хрусталева и др., 2008].

1, 2 – результаты инструментальных наблюдений (1 – ежегодные, 2 – сглаженные 10-летним скользящим средним); 3, 4 – результаты модельных расчетов по сценариям МЭИ и МГЭИК соответственно.

(с изменениями применительно к задачам данной статьи) график прогноза температуры до 2100 г., на котором показаны тренды изменения сглаженных среднегодовых температурных аномалий для севера Западной Сибири, полученные по двум климатическим сценариям: с помощью модели климата, разработанной в Московском энергетическом институте (сценарий МЭИ), и по сценарию МГЭИК. Согласно Л.Н. Хрусталева с соавторами [2008], отличие этих двух сценариев связано с различными предположениями о динамике антропогенных факторов, которые зависят от численности населения Земли и роста потребления энергетических ресурсов. Заметим, что климатический сценарий МЭИ более умеренный.

Как видно из рис. 8, повышение температуры, начавшееся после 1970 г., может продолжаться до конца столетия. По сценарию МГЭИК прогнозируется почти линейный рост среднегодовой температуры до 2100 г. с ее повышением к концу века по сравнению с настоящим временем до 3.5 °С. По более умеренному сценарию МЭИ (см. рис. 8) величина максимального потепления может составить к концу прогнозного периода 2 °С по сравнению с настоящим временем.

Результат прогнозирования динамики термокарстово-озерных полей на территории Западной

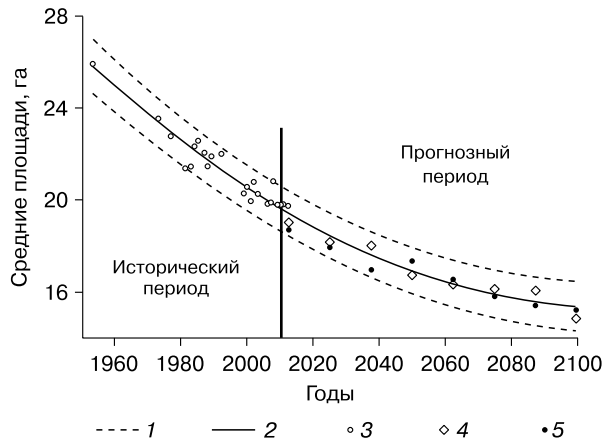


Рис. 9. Прогнозирование динамики среднего значения площади термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири.

1 – граница интервала предсказания; 2 – линия тренда; 3 – модельные значения площадей озер; 4 – прогнозные значения по сценарию МЭИ; 5 – прогнозные значения по сценарию МГЭИК.

Сибири до конца столетия приводится на рис. 9 в виде графика временной зависимости среднего значения площади термокарстовых озер. Исторический период графика представлен модельными значениями средних площадей озер (полые кружочки), полученными с использованием геоимитационно-регрессионной модели динамики полей озер. Расчет параметра модели λ проводился по уравнению множественной регрессии (2) без учета уровня осадков на основе тренда среднегодовой температуры, определенного по данным реанализа.

В прогнозный период 2010–2100 гг. результаты представлены усредненными в 10-летних интервалах прогнозными значениями средних площадей озер для двух сценариев климатического прогноза: полыми ромбами отображены модельные значения для сценария МЭИ, черными точками – для сценария МГЭИК. Прогнозные значения для обоих сценариев не выходят за пределы интервала предсказания, что позволяет сделать вывод о близости прогнозов динамики площадей термокарстовых озер независимо от некоторых различий рассматриваемых сценариев климатических изменений (см. рис. 9).

Наиболее важным результатом анализа прогнозных оценок, представленных на рис. 9, является вывод о продолжении сокращения средней площади термокарстовых озер Западно-Сибирской зоны мерзлоты. Из графика на рис. 9 можно определить, что в конце прогнозного периода средняя площадь озер может сократиться до 12 га (предполагаемые изменения площади от 10.2 до 13.8 га).

Таким образом, площади озер в зоне мерзлоты Западной Сибири в среднем могут сократиться по отношению к настоящему времени приблизительно на 30 %. Другой важный вывод из анализа прогнозных оценок (см. рис. 9) – снижение темпа сокращения площади озер. По нашим данным [Полищук В.Ю., Полищук Ю.М., 2013], прогнозируемое сокращение средней площади озер на исследуемой территории за 20-летний период (2010–2030 гг.) может составить 9.6 %. Как видно из рис. 9, за 20-летний период (2080–2100 гг.) возможное сокращение средней площади озер оценивается около 6 %. Следовательно, темпы сокращения площадей озер к концу прогнозируемого периода могут снизиться в 1.5–2 раза относительно настоящего времени.

Таким образом, если повышение среднегодовой температуры приземной атмосферы будет продолжаться до конца нынешнего столетия, оно будет сопровождаться сокращением в среднем площадей термокарстовых озер криолитозоны Западной Сибири, что может стать следствием деградации мерзлоты и снижения прочности многолетнемерзлых пород. Объяснением этого факта может служить то, что активизация термокарстовых процессов в результате продолжающегося снижения прочности мерзлых пород будет вызывать, наряду с термоэрозионными факторами, и ускоренное образование новых термокарстовых озер [Брыксина, Полищук, 2015], малые размеры которых будут способствовать сокращению величины средней площади озер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная геоимитационно-регрессионная модель динамики полей термокарстовых озер, учитывающая региональные взаимосвязи между геокриологическими и климатическими изменениями, позволила спрогнозировать изменения размеров термокарстовых озер в условиях изменения климата до конца текущего столетия. Долгосрочный прогноз динамики термокарстово-озерных полей с использованием указанной модели показал, что по мере роста среднегодовой температуры приземной атмосферы площади озер в зоне мерзлоты Западной Сибири в среднем будут сокращаться приблизительно на 30 % к концу прогнозного периода.

Прогнозируемое сокращение в среднем площадей озер на протяжении будущих десятилетий может быть объяснено тем, что активизация термокарстовых процессов в результате продолжающегося снижения прочности мерзлых пород в условиях предполагаемого потепления климата будет вызывать, наряду с термоэрозионными факторами, и ускоренный рост числа новых термокарстовых озер [Брыксина, Полищук, 2015], малые

размеры которых будут способствовать сокращению величины средней площади озер как показателю ускорения деградации многолетнемерзлых пород под воздействием потепления климата, что необходимо учитывать при проектировании объектов инфраструктуры и других инженерных сооружений на территории многолетней мерзлоты.

Работа выполнена по договору с Министерством образования и науки Российской Федерации (№ 14.В25.31.0001 от 24 июня 2013 г. (ВIO-GEO-CLIM)) и при финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-01-31489; 15-45-00075).

Литература

- Брыксина Н.А., Полищук Ю.М.** Анализ изменения численности термокарстовых озер в зоне многолетней мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 114–120.
- Викторов А.С.** Основные проблемы математической морфологии ландшафта / А.С. Викторов. М., Наука, 2006, 252 с.
- Вуколов Э.А.** Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL: Учеб. пособие / Э.А. Вуколов. М., ФОРУМ: ИНФРА-М, 2004, 464 с.
- Днепровская В.П., Брыксина Н.А., Полищук Ю.М.** Изучение изменений термокарста в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты Западной Сибири на основе космических снимков // Исслед. Земли из космоса, 2009, № 4, с. 88–96.
- Доверительные интервалы и интервалы предсказания, 05.12.2010** [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/portal/glossary/glossarytwo/C/ConfidenceIntervalvsPredictionInterval.htm> (дата обращения: 07.04.2011).
- Изменение климата, 2007 г.:** Обобщающий докл. Вклад рабочих групп I, II и III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под ред. Р.К. Пачаури, А. Райзингера. Женева, Швейцария, МГЭИК, 2007, 104 с.
- Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А.** Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления // Вестн. ТГУ, 2008, № 311, с. 185–189.
- Клименко В.В., Хрусталева Л.Н., Микушина О.В., Емельянова Л.В., Ершов Э.Д., Пармузин С.Ю., Терешин А.Г.** Изменения климата и динамика толщ многолетнемерзлых пород на северо-западе России в ближайшие 300 лет // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 3, с. 3–13.
- Кравцова В.И.** Распространение термокарстовых озер в России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2009, № 3, с. 33–42.
- Кравцова В.И., Тарасенко Т.В.** Изучение и картографирование динамики термокарстовых озер на территории Западной Сибири по разновременным космическим снимкам // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата, 2010, № 1, с. 82–87.
- Кремер Н.Ш.** Теория вероятности и математическая статистика: Учеб. для вузов / Н.Ш. Кремер. М., ЮНИТИ-ДАНА, 2003, 573 с.
- Полищук В.Ю.** Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты / В.Ю. Полищук, Ю.М. Полищук. Ханты-Мансийск, УИП ЮГУ, 2013, 129 с.

Полищук Ю.М., Полищук В.Ю. Имитационное моделирование полей термокарстовых озер на территории многолетней мерзлоты // Информац. системы и технологии, 2011а, № 1 (63), с. 53–60.

Полищук Ю.М., Полищук В.Ю. Моделирование пространственно-временной динамики термокарста в зонах многолетней мерзлоты // Информац. системы и технологии, 2011б, № 3, с. 25–31.

Полищук Ю.М., Полищук В.Ю. Дистанционные исследования изменчивости формы береговых границ термокарстовых озер на территории многолетней мерзлоты Западной Сибири // Исслед. Земли из космоса, 2012, № 1, с. 61–64.

Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России. М., Росгидромет, 2005, 30 с.

Хрусталева Л.Н., Клименко В.В., Емельянова Л.В., Ершов Э.Д., Пармузин С.Ю., Микушина О.В., Терешин А.Г. Динамика температурного поля многолетнемерзлых пород южных районов криолитозоны при различных сценариях

климатических изменений // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 1, с. 3–11.

Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования / Е.М. Четыркин. М., Статистика, 1977, 200 с.

APHRODITE's SCOPE, 02.02.2011 [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.chikyu.ac.jp/precip/scope/index.html> (дата обращения: 18.04.2011).

European Center for Medium-Range Weather Forecast, 01.03.2011 [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.ecmwf.int> (дата обращения: 18.04.2011).

Meteorological reanalysis, 06.02.2011 [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://en.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 14.04.2011).

Polishchuk V., Polishchuk Yu. Modeling of thermokarst lake dynamics in West-Siberian permafrost. Chapter 6 // Permafrost: Distribution, Composition and Impacts on Infrastructure and Ecosystems / Ed. by O. Pokrovsky. N.Y., Nova Sci. Publ., 2014, p. 205–234, doi: 10.978-94-007-4569-8.

*Поступила в редакцию
11 августа 2014 г.*