

УДК 550.83

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ 3D ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

С.А. Великин¹

¹ ВНИМС ИМЗ СО РАН. 678185, Россия, Республика Саха(Якутия), Мирнинский район; п.Чернышевский, Квартал ВНИМС, д.7;
e-mail: frozen@mirny.sakha.ru

Аннотация. Применение пространственно-временных интерполяционных 3D технологий обработки режимных геофизических наблюдений, используя их временную периодичность в качестве дополнительной координаты, позволяет выявлять информативные признаки развития инженерно-геокриологических процессов в условиях природно-технологических помех, неизбежно присутствующих на территории промышленных сооружений в криолитозоне. В работе показаны возможности 3D технологий обработки в задачах мониторинга состояния оснований гидротехнических сооружений в криолитозоне.

Ключевые слова. Криолитозона; геофизика; электротомография, гидротехническое сооружение; фильтрация.

APPLICATION OF 3D INTERPRETATION TECHNOLOGIES TO SOLVING FOUNDATION MONITORING PROBLEMS AT HYDROPROJECTS IN PERMAFROST REGIONS

Sergey A. Velikin¹

¹ Vilyui Permafrost Research Station, Melnikov Permafrost Institute SB RAS 7, quarter VNIMS, Chernyshevsky, 678185, Russia;
e-mail: frozen@mirny.sakha.ru

Abstract. For many permafrost foundation monitoring problems, spatial representation of the temporal changes in geophysical sections is important to monitor the development of natural and human-induced processes in the zones where engineering structures interact with permafrost which is highly sensitive to anthropogenic disturbances. This paper demonstrates the applicability of 3D data processing technologies to permafrost foundation monitoring at dams and other hydroprojects.

Key words. Permafrost; geophysics; electrical resistivity tomography; hydroproject; seepage.

ВВЕДЕНИЕ. Пространственное представление временной динамики геофизических разрезов — основа для решения большинства задач долговременных наблюдений для изучения и контроля развития техноприродных процессов в зоне взаимодействия оснований и сооружений, расположенных на территории криолитозоны [4], которая является наиболее уязвимой для антропогенных (природно-техногенных воздействий). Для мерзлых пород основную опасность для эксплуатации сооружений представляет переход мерзлых пород в талое состояние и, как следствие, потери устойчивости грунтов, вмещающих основания фундаментов, активизация оползневых процессов, возникновение обходной фильтрации и другие. В последнем случае эти процессы представляют особую опасность для гидротехнических сооружений, а в условиях засоленности и наличия внутримерзлотных вод могут приводить к катастрофическим последствиям [3].

Инженерное мерзлотоведение и контроль фазовых переходов

Каждый фазовый переход «мерзлое-талое» состояние сопровождаются изменением целого ряда основных физических, физико-химических и механических свойств горных пород и определяет устойчивость оснований сооружений. Причем, эти изменения в зависимости от литологического состава пород, засоленности и внешних условий могут происходить в значительном диапазоне отрицатель-

ных температур, и всегда сопровождаются изменениями свойств грунтов за счет протекающих в них сложных физико-химических процессов, определяющих характер фазовых переходов лед — поровый раствор. При этом в криогенной сфере наблюдаются изменения ряда физических полей. Наиболее активно эти изменения проявляются в пространственно-временных вариациях электрохимической активности, поляризуемости, диэлектрической проницаемости, величины и механизмов электропроводности, а также упругости, вязкости, прочности и др.

Отсюда вытекает возможность и необходимость наряду с термическими режимными системами наблюдений, применять в реальном масштабе времени геофизические методы и, в первую очередь, методы электротометрии, поскольку фазовые переходы при протаивании и замерзании сопровождаются скачком электропроводности, что может быть критерием инженерно-геокриологического состояния мерзлых пород.

В связи с этим обстоятельством для контроля состояния оснований сооружений в криолитозоне наиболее часто и результативно используются электротомографические геофизические методы. В последние годы для решения инженерно-геокриологических задач в мировой практике часто используется электротомография [1], [3], [6], [9], [13]. Электротомография применяется при решении задач экологической и археологической геофизики; разведки углеводородов; инженерных изысканий; гидрогеологии;

мониторинга хранилищ радиоактивных отходов и в рудной геофизике [11].

Электротомографию в рамках режимных наблюдений на ГТС (в особенности на линейных грунтовых плотинах) применяли многие авторы [7], [8], [12], [14], [15]. Но для корректной интерпретации геофизических аномалий необходимо учитывать влияние боковых неоднородностей – рельефа плотины и уровня воды в верхнем бьефе, а также инженерных конструкций в массивах пород береговых устоев сооружений. Хотя теоретически это возможно с помощью математического моделирования, но на практике это мало осуществимо из-за сложности задачи и необходимости учета влияния изменения совокупного влияния динамики поверхностных сезонно-климатических условий мощности и электропроводности сезонно-талого слоя, изменения уровня воды водохранилищ и степени заполнения уже действующих фильтрационных коллекторов. А для случая обходной фильтрации эти обстоятельства усложняются расположением больших по размеру (десятки и сотни метров) линейных измерительных линий вдоль объездных дорог створов сооружений, т.е. вдоль фильтрационных каналов, а не поперек, что резко уменьшает возможности их картирования.

Для уменьшения неоднозначности интерпретационных возможностей, возникающих в силу вышеозначенных обстоятельств, автором предложено применение пространственно-временных интерполяционных 3D технологий для обработки режимных геофизических наблюдений, а также и для площадных режимных гидрогеологических исследований. Использование их временной периодичности в качестве дополнительной координаты, позволяет выявлять информативные признаки развития негативных инженерно-геокриологических процессов в условиях природно-технологических помех, неизбежно присутствующих на территории промышленных сооружений в криолитозоне. Применение различных вариантов 3D обработки для мониторинга состояния оснований гидротехнических сооружений дает возможность своевременно выявлять тренды развития геоэлектрических особенностей связанных с продвижением фильтрационных потоков, за счет учета интерполяции всего блока режимных наблюдений и уменьшения неизбежных отдельных ошибок – выпал электрод, незначительное смещение установок и другие.

Модели и моделирование

При контроле состояния береговых примыканий гидроэнергетических сооружений, плотин и дамб гидротехнических сооружений (водохранилищ, накопителей жидких промышленных отходов и др.), а также оснований линейных сооружений энергетической и нефтегазовой промышленности, встает вопрос создания единой инженерно-геофизической объемной модели изученного периода в целом, для оценки и прогноза состояния изучаемых разрезов оснований сооружений.

Будем условно понимать под объемным геологическим моделированием конструирование,

и формирование модели на основании геолого-геофизических предпосылок о строении изучаемого пространства такое, что делает возможным проведение корректировки предполагаемого положения геологических границ в связи с появлением новых фактических данных.

Под моделью, в общем понимании подразумевается любой образ (описательный, предметный, графический, математический) какого-либо объекта, процесса или явления. Для конкретизации понятия модели необходимо определить оригинал, ею отображаемый, и способ его отображения. Обычно оригиналом объемной инженерно-геофизической модели является блок земной коры (или процессов в нем протекающих), в плане совпадающий с изучаемым участком. Высота (глубина) этого блока зависит от решаемой инженерно-геологической задачи. Далее, вышеприведенное представление модели заменяется дискретным – линейными или криволинейными профилями, каждый из которых представлен множеством точек (сетью) геофизических измерений.

Графически эту модель можно изображать в виде набора разрезов вдоль отдельных профилей изучаемого объекта. Изменения в результатах одномоментных измерений с течением времени можно назвать динамикой модели и трактовать как временное отображение изучаемого состояния участка земной коры, представленного набором геофизических разрезов отождествляемых с гипотетическими инженерно-геокриологическими структурами.

Если отталкиваться от математического характера используемой модели, то ее качество зависит от используемого математического аппарата (системы интегро-дифференциальных уравнений математической геофизики и численных методов их решения).

Основные методы интерполяции, такие как интерполяция с помощью скользящего среднего, полиномиальная интерполяция, кусочно-полиномиальная интерполяция методом наименьших квадратов, сплайн интерполяция, кригинг и другие широко применяются в программных комплексах при решении различных двумерных геологических и геофизических задач, поэтому мы не будем останавливаться на их особенностях.

Отметим только, что в 3D варианте эти методы для обработки геофизических данных практически не используются из-за многократного увеличения сложности алгоритмов и длительности процедур обработки. В связи с этим в программах 3D обработки в большинстве случаев и используются преобразования двумерных данных в трехмерные.

Возможности предлагаемой технологии были опробованы автором на ряде гидротехнических объектов Западной Якутии.

Неполноценность моделей и способы ее компенсации

Во многих производственно значимых случаях невозможно использовать полноценные 3D модели, но можно применять их аппроксимации совокупностью 2D моделей. На фотографии (рис. 1)



Рис. 1
Правобережное примыкание Вилуйской ГЭС

показана Вилуйская ГЭС (ВГЭС-1, Зап. Якутия), «встроенная» в скальный массив траппового поля и опорный мониторинговый геофизический профиль (красным), контролирующий предполагаемый процесс правобережной обходной геофильтрации. Как видно из рисунка, проведение площадных геофизических работ методом электротомографии затруднительно. Таким образом, при наличии единственного опорного профиля возникает актуальная задача имитации дополнительных площадных электротомографических «псевдо-измерений», как способ компенсации неполноты 3D модели в данных инженерно-геологических условиях. Также отметим, что инженерно-геофизические исследования зачастую имеют практический интерес только в случае, если они позволяют фиксировать инженерно-геологические процессы различной природы.

В нашем случае речь идет о процессах развития обходной фильтрации вследствие растепления мерзлой толщи в правобережном примыкании ВГЭС-1, которые мы хотим контролировать при помощи только одного опорного геофизического профиля.

В геоэлектрических полях, в отличие от упругих полей сейсмических исследований, физическая картина более проста, и 3D поле может быть аппроксимировано набором 2D измерений, поэтому автор предпринял попытку использования режимных измерений по опорному профилю путем введения фиктивных площадных измерений в соответствующих 3D программах электротомографии.

Конечной целью таких построений было получение содержательной (дополнительной) геоинженерной информации, которая не всегда может быть выявлена при помощи только стандартной 2D интерпретации электротомографических данных.

Аппроксимация 3D моделей набором 2D моделей

Как уже упоминалось выше, для необходимой 3D обработки временных режимных наблюдений можно использовать преобразования двумерных данных в трехмерные, для чего существует много алгорит-

мов (последовательной интерполяции, методы кригинга и др.) и прикладных программных средств (например, Surfer, Коскад 3D и др.), выбор которых зависит от характера имеющихся данных [2], [5], [10].

Применение конкретного вида обработки, включающей интерполяцию, фильтрацию или другие математические процедуры, часто связано с трудоемким процессом выбора оптимального решения, а также настройки и подбора параметров обработки.

Для решения подобных задач возможно использовать алгоритмы двумерной линейной интерполяции, двумерной сплайн интерполяции, Фурье интерполяции и другие, хорошо зарекомендовавшие при работе с большими объемами самой разнообразной геолого-геофизической информации.

Двумерная линейная интерполяция является самой простой, но результаты, полученные с ее помощью, базируются исключительно на имеющихся в распоряжении пользователя данных. Сплайн интерполяция широко используется в различных прикладных областях, но ее использование может привести к результатам, которые противоречат общим геологическим закономерностям. Фурье интерполяция позволяет получать гладкие интерполяционные решения, но при определенных значениях шага интерполяции возможны так называемые «биения», которые связаны с особенностями Фурье преобразования. Таким образом, для качественного решения задачи интерполяции в распоряжении исследователя должны быть несколько различных интерполяционных модулей. То же самое касается задач экстраполяции.

Ниже приводятся примеры использования 3D программ для оценки состояния участка береговых примыканий Вилуйской ГЭС в период развития процессов обходной фильтрации.

Мониторинг геофильтрации методом электротомографии

С целью выявления развития обходной фильтрации в правобережном примыкании ВГЭС-1 (рис. 1), на протяжении ряда лет проводятся режимные (мониторинговые) измерения методом электротомографии на фиксированном опорном геофизическом профиле. Сам процесс геофильтрации в скальном массиве своим происхождением обязан техногенному талику в правобережных карбонатных ксенолитах. Последний контролируется температурными наблюдениями правобережного скважинного полигона ВГЭС-1.

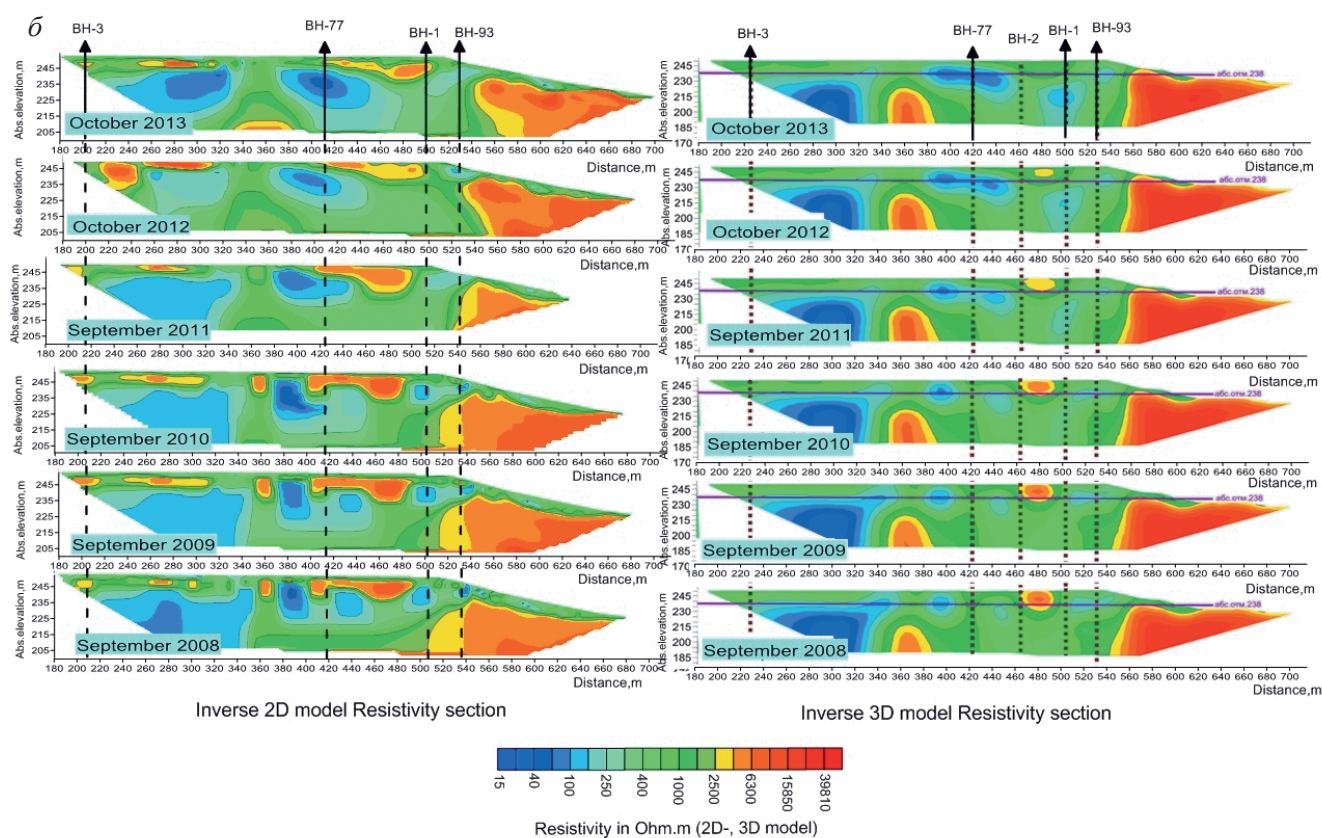
Поскольку расширение скважинного полигона на все пространство правобережного примыкания является дорогостоящим мероприятием, то чрезвычайно актуально альтернативное применение геофизических методов контроля динамики ореола геофильтрации.

На рисунке 2 приводятся примеры использования 2D и 3D программ для оценки состояния участка береговых примыканий в период развития процессов обходной фильтрации (рис. 2). Сравнение разрезов показывает, что стандартная 2D технология недо-



Рис. 2

а – расположение режимного электротомографического профиля;
б – томографические разрезы построенные по технологиям 2D и 3D.



статочно четко выявляет тенденции развития низкоомных зон, связанных с фильтрационными окнами, в то время как использование 3D технологии в режимных наблюдениях более уверенно решает эту задачу.

Также способ 3D интерполяции результатов электротомографии оказался применим и для определения динамичных фильтрационных зон и скоростей фильтрации, что весьма сложно в условиях существования долговременной обходной фильтрации в береговых примыканиях водохранилищ, когда в результате их действия эти участки значительно теплены. Это снижает различие в контрастности слабо и сильно фильтрующих зон, что сильно затрудняет их выявление.

Определение скоростей геофильтрации методом электротомографии

Для определения скоростей фильтрации был использован индикаторный способ, где исследования проводились заливом индикатора раствора NaCl в пьезометрическую скважину и проведением режимных электротомографических измерений по профилю (рис.3) перпендикулярному предполагаемым линиям фильтрационных потоков.

Скорость фильтрации определялась по формуле:

$$V_{\phi} = \frac{L}{\Delta t},$$

где: L – расстояние между точкой засола и точкой наблюдения, Δt – время между моментом засола

и моментом начала устойчивого падения электрического сопротивления подземных вод в наблюдаемой скважине.

В пьезометрическую скважину (рис. 3 – красный кружок) было залито 6 м³ рассола. По профилю общей длиной 360 метров (рис. 3 – красный отрезок) измерения фиксировались аппаратурой Iris Instruments Syscal-Pro через каждые 5 минут. Длительность измерений в целом составила 2 часа 40 минут. Для определения направления и скорости фильтрации использовалась покадровая по времени инверсия метода сопротивлений (рис. 4).

В этом способе начальный массив данных используется для наложения ограничений на инверсию данных для более поздних интервалов времени, чтобы минимизировать изменения сопротивлений модели, когда маловероятно, что они отражают реальные изменения. После чего полученные данные были обработаны в программе «КОСКАД 3D», для выявления динамичных изменений на фоне неизменно присутствующих помех, связанных с влиянием ЛЭП обслуживающих сам гидроузел и систему городского водоснабжения.

В ходе интерпретации был выявлен участок повышения электропроводности и определена скорость фильтрации, которая составила 288 м/час, что гораздо выше ожидаемых на этом участке ско-

ростей, которые если судить по результатам работ прошлых лет не должны были превышать первой сотни метров.



Рис. 3
Схематическое расположение наблюдательного профиля и пьезометрической скважины. Сытыкан, Зап. Якутия

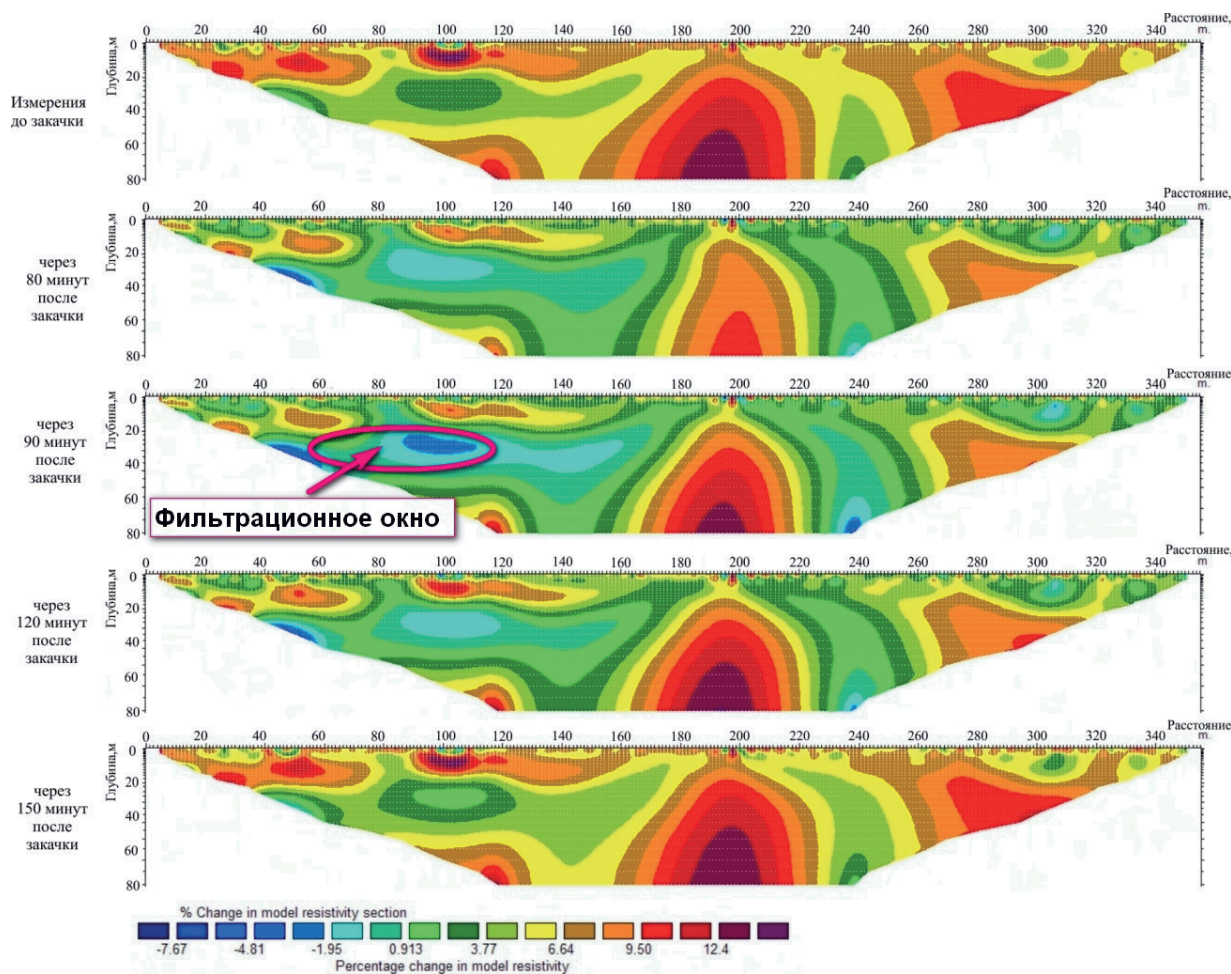


Рис. 4

Использование режимных электротомографических измерений для выявления фильтрационных окон и определения скоростей фильтрации

Экстраполяция и прогноз данных пьезометрии

Использование 3D технологий также применимо для гидротехнических задач, для оценки и прогноза динамики положения купола и скорости распространения захороняемых рассолов, получаемых при разработке алмазоносных карьеров. Эффективность достигается счет снижению уровня помех измерения (выход из строя и засор наблюдательных скважин, сложности замеров уровней на больших глубинах, влияние человеческого фактора и др.) и выявления

основных трендов. В частности такой анализ помог уточнить особенность распространения рассолов в толще карбонатных мерзлых пород, характеризующуюся ростом купола в районе закачки, сменяющийся его провалом при достижении критического уровня. Эти данные могут использоваться для оптимизации режима захоронения рассолов.

Ниже на рисунках представлены снимок участка захоронения минерализованных вод кимберлитового карьера алмазодобывающего предприятия (рис. 5), и план с картой изогипс пьезометрического уровня.

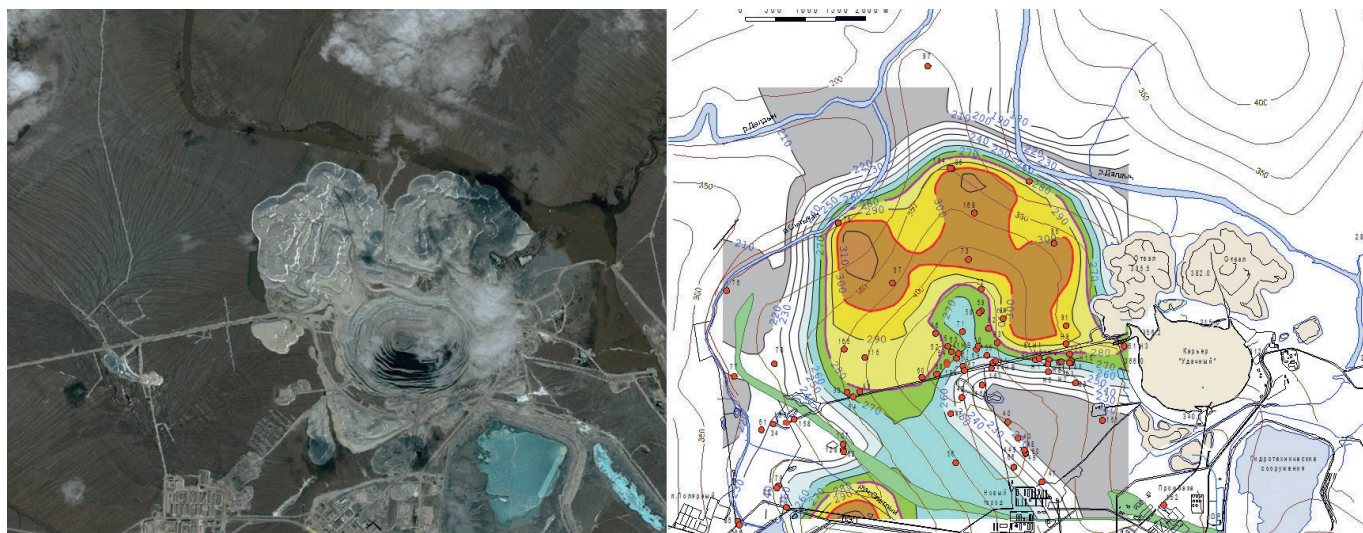


Рис. 5

Снимок участка захоронения и план участка с изогипсами рельефа и изогипсами пьезометрического уровня (1991 г.) купола закачиваемых рассолов

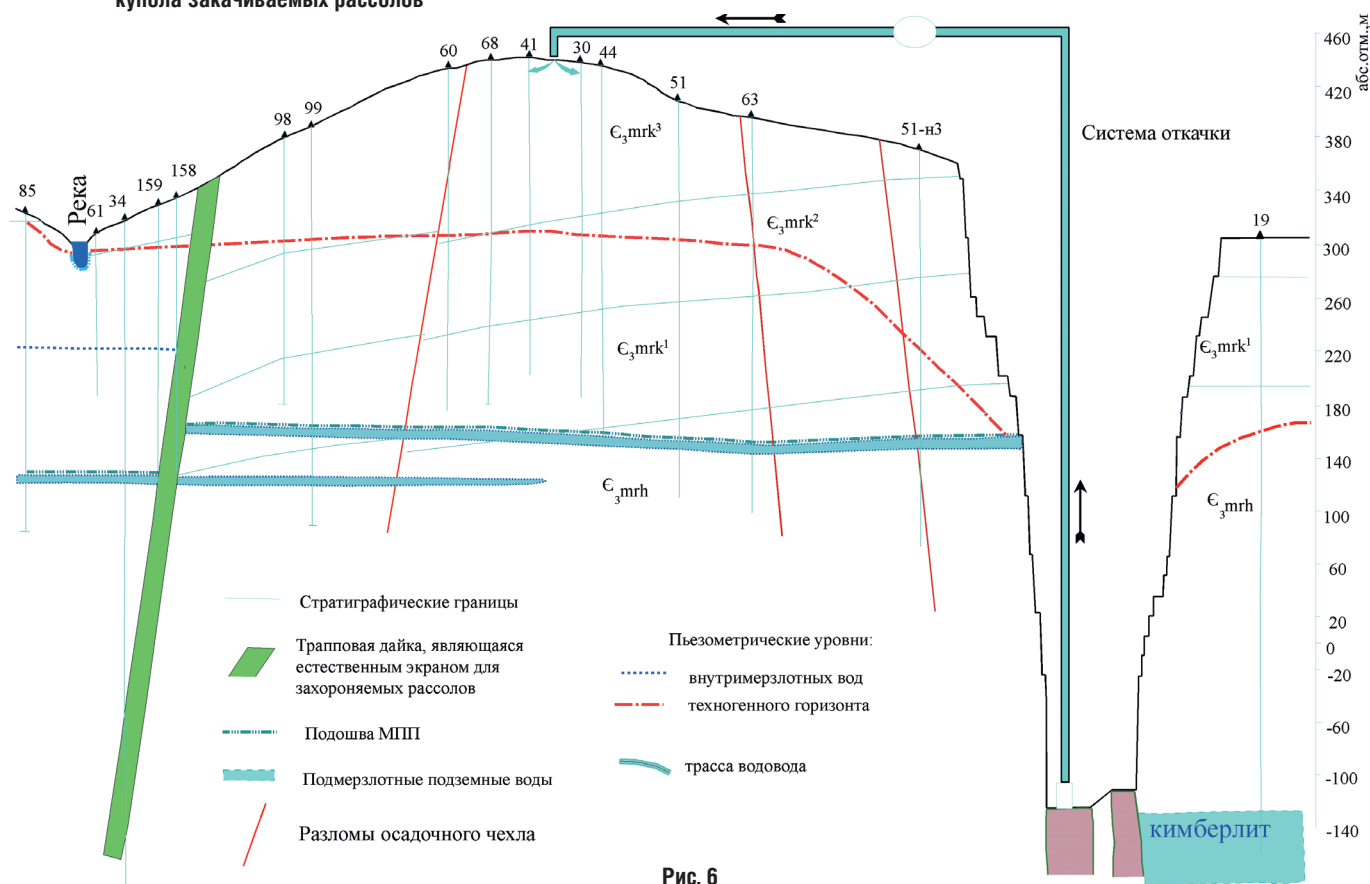


Рис. 6

Система захоронения минерализованных вод в толще мерзлых пород

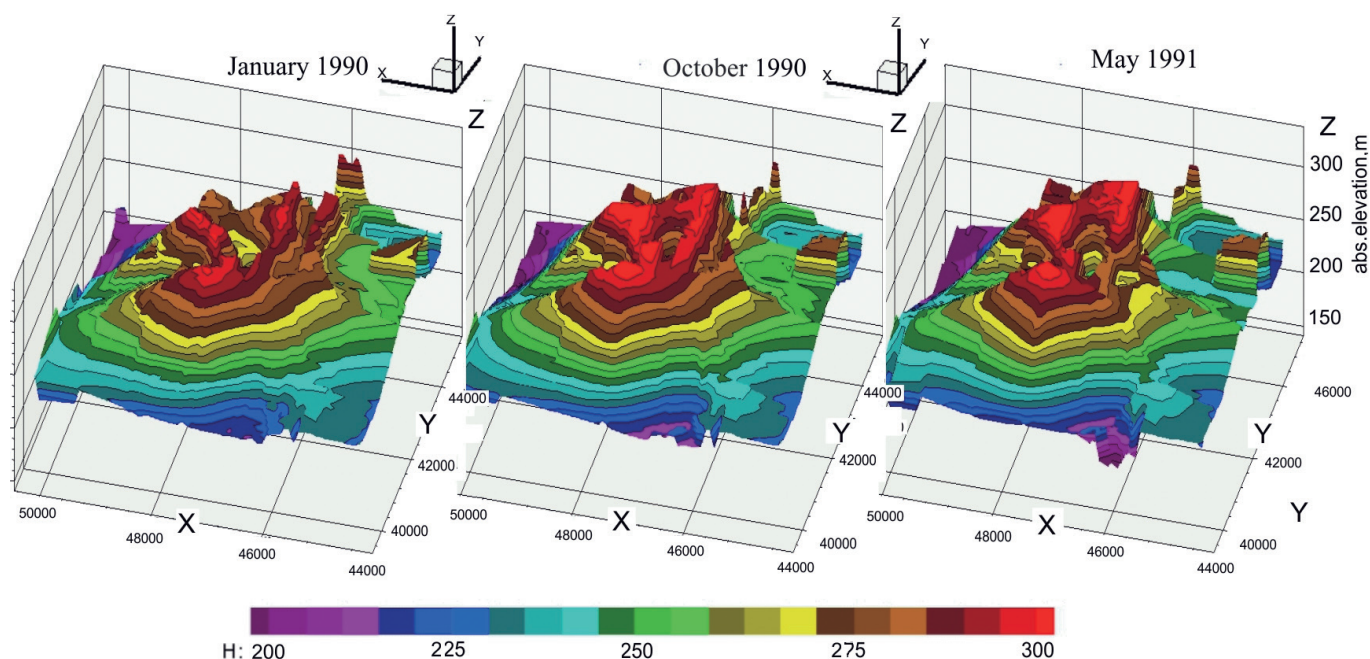


Рис. 7

Оценка характера распространения купола захороняемых рассолов в разные годы, с помощью 3D программ

На рисунке 6 представлена схема откачки и захоронения минерализованных вод в цикле отработки кимберлитового и пьезометрические поверхности на разные годы построенные с помощью 3D интерполяции (рис. 7).

Использование временной 3D обработки многолетней динамики уровней позволило оценить основные закономерности распространения захороняемых рассолов, в частности, смену роста купола закачиваемых рассолов, провалами рассолов на более низкие горизонты по образовавшимся гидродинамическим окнам и распространением по латерали следующими периодами роста купола пьезометрического уровня.

Эти данные были впоследствии использованы для прогноза характера и расчета периода безопасной эксплуатации участка захоронения

Выводы. Применение пространственно-временных интерполяционных 3D технологий для обработки режимных геофизических наблюдений, а также и для площадных режимных гидрогеологических исследований, дает возможность, используя их временную периодичность в качестве дополнительной координаты, выявлять информативные признаки и в целом ряде случаев спрогнозировать развитие инженерно-геокриологических процессов на территории промышленных сооружений в криолитозоне в условиях неизбежно присутствующих природно-технологических помех.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобачев А.А., Яковлев А.Г., Яковлев Д.В. Электро-томография – высокоразрешающая электроразведка на постоянном токе. Инженерная геология, 2007, 31–35 с.
2. Бруснецов Н.П., Дмитриев В.И., Жданов М.С., и др. Справочник геофизика: Вычислительные математика и техника в разведочной геофизике, М.: Недра, 1990.
3. Великин С.А., Марченко Ю.Л. Научно-методические основы геофизического мониторинга крупных гидро- и горнотехнических сооружений в криолитозоне Якутии. Материалы 5-й конференции геокриологов России «Геотехника в криолитозоне» (14–16 июня 2016 г., г. Москва). Москва «Университетская книга» 2016. Т. 1. Ч. 4. С. 305–311.
4. Великин С.А., Шестернев Д.М. Научно-методические основы геофизического мониторинга гидро- и горнотехнических сооружений в криолитозоне Якутской алмазоносной провинции. Материалы международной научно-практической конференции и выставки ЕАГО, «Инженерная, угольная и рудная геофизика-2015, современное состояние и перспективы развития», г. Сочи, 2015. С. 184–196.
5. Демура Г.В., Лукина О.П., Никитин А.А. Выделение геофизических аномалий с помощью самообучающихся фильтров. Геология и разведка 1973, № 9, 103–109 с.
6. Ерохин С.А., Модин И.Н., Паленов А.Ю., Шевнин В.А. Картирование реликтовых криогенных полигональных структур с помощью геофизических методов. Инженерные изыскания, ПНИИИС, 2011, 30–34 с.
7. Козлов О.В., Павлова А.М. Геоэлектрический мониторинг каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС методом геоэлектротомографии. Инженерные изыскания. 2013. № 12, 40–47 с.
8. Модин И.Н., Макаров Д.В., Александров П.Н. Возможности электротомографических станций при выполнении мониторинговых наблюдений. Инженерные изыскания. 2014. № 9–10. 22–31 с.
9. Павлова А.М., Шевнин В.А. 3D-электротомография при исследовании ледниковых отложений. Геофизика, ЕАГО, № 6. 2013, 32–37 с.
10. Петров А.В., Никитин А.А., Зиновкин В.С. Развитие статистических приемов обработки и интерпретации геофизических полей в компьютерной технологии «КОСКАД 3D», Геология и разведка 2007, № 7. 68–74 с.

11. Barker R. and Moore J. 1998. The use of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. The Leading Edge, 17, 1454–1458.

12. Boleve A., Revil A., Janod F., Mattiuzzo J.L., Fry J.-J. Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography. Near Surface Geophysics, 2009, Vol. 7, 447–462 p.

13. Costica I., Linde N., Greenhagh S., Gunter Th., Green A. A filtering method for correct time-lapse 3D data and improve imaging of natural aquifer dynamics, Journal of Applied geophysics, 80(2012), 12–24 p.

14. Dahlin T., Sjödal P., Johansson S. Embankment dam seepage evaluation from resistivity monitoring data. Near Surface Geophysics, 2009, Vol. 7, 463–474. p.

15. Sjödal P., Dahlin T., Johansson S., Loke M.H. Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam. Journal of Applied Geophysics, 2008, 65 (3–4), 155–164 p.

REFERENCES

1. Bobachev AA, Yakovlev AG, Yakovlev DV. Elektrotomografiya – vysokorazreshayushchaya elektrorazvedka na postoyannom toke. [Electrical resistivity tomography – high-resolution electrical prospecting with direct current.] Inzhenernaya geologiya 2007. P. 31–35 (in Russian).

2. Brusnetsov NP, Dmitriev VI, Zhdanov MS et al. Spravochnik geofizika: Vychislitelnye matematika i tekhnika v razvedochnoy geofizike. [Handbook of Geophysics: Computational mathematics and engineering in exploration Geophysics.] Moscow, Nedra, 1990 (in Russian).

3. Velikin SA, Marchenko JL. Nauchno-metodicheskiye osnovy geofizicheskogo monitoringa krupnykh gidro- i gornotekhnicheskikh sooruzheniy v kriolitozone Yakutii. [Scientific-methodological basis for geophysical monitoring of large hydro and mining engineering structures in the permafrost zone of Yakutia.] Materialy 5-y konferentsii geokriologov Rossii «Geotekhnika v kriolitozone» (14–16 iyunya 2016 g., g. Moskva). Moskva «Universitetskaya kniga» 2016. T. 1. H. 4. 305–311 p. (in Russian).

4. Velikin SA, Shesternev DM. Nauchno-metodicheskiye osnovy geofizicheskogo monitoringa gidro- i gornotekhnicheskikh sooruzheniy v kriolitozone Yakutskoy almazonosnoy provintsii. [Scientific-methodical bases of geophysical monitoring hydraulic and mining engineering structures in cryolithozone Yakutsk diamondiferous province.] Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i vystavki EAGO. «Inzhenernaya, ugolnaya i rudnaya geofizika-2015. sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya». Sochi, 2015. 184–196 p. (in Russian).

5. Demura GV, Lukina OP, Nikitin AA. Vydeleniye geofizicheskikh anomalii s pomoshchyu samoobuchayushchikhsya filtrov. [Selection of geophysical anomalies with the help of self-learning filters.] Geologiya i razvedka 1973, № 9, 103–109 p. (in Russian).

6. Erokhin SA, Modin IN, Palenov AY, Shevvin VA. Kartirovaniye reliktovykh kriogennykh poligonalnykh struktur s pomoshchyu geofizicheskikh metodov. [Mapping of relict cryogenic structures using geophysical methods.] Inzhenernyye izyskaniya. PNIIS, 2011, 30–34 p. (in Russian).

7. Kozlov OV, Pavlova MA. Geoelektricheskiy monitoring kamennno-nabrosnoy plotiny Boguchanskoy GES metodom geoelektrotomografii [Geoelectrical monitoring of rock-fill dam of the Boguchanskaya HPP method Geoelectromagnetic.] Inzhenernyye izyskaniya. №12 / P. 40–47. (in Russian).

8. Modin I. N., Makarov D. V., Aleksandrov P. N. Vozmozhnosti elektrotomograficheskikh stantsiy pri vypolnenii monitoringovykh nablyudeniy. [Opportunities electrotomography stations when performing monitoring observations]. Inzhenernyye izyskaniya, 2014. № 9–10. P. 22–31 (in Russian).

9. Pavlova AM, Shevvin VA. 3D-elektrotomografiya pri issledovanii lednikovykh otlozheniy. [3D-electrical resistivity tomography in the study of glacial sediments.] Geofizika, EAGO, № 6. 2013, 32–37 p. (in Russian).

10. Petrov AV, Nikitin AA, Zinovkin VC. Razvitiye statisticheskikh priyemov obrabotki i interpretatsii geofizicheskikh poley v kompyuternoy tekhnologii «KOSKAD 3D». [Development of statistical methods of processing and interpretation of geophysical fields in computer technology «COSCAD 3D».] Geologiya i razvedka, 2007, № 7. 68–74 p. (in Russian).

11. Barker R and Moore J. 1998. The use of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. The Leading Edge, 17, 1454–1458 p.

12. Boleve A, Revil A, Janod F, Mattiuzzo JL, Fry J.-J. Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography. Near Surface Geophysics, 2009, Vol. 7, 447–462 p.

13. Costica I, Linde N, Greenhagh S, Gunter Th, Green A. A filtering method for correct time-lapse 3D data and improve imaging of natural aquifer dynamics, Journal of Applied geophysics, 80(2012), 12–24 p.

14. Dahlin T, Sjödal P, Johansson S. Embankment dam seepage evaluation from resistivity monitoring data. Near Surface Geophysics, 2009, Vol. 7, 463–474. p.

15. Sjödal P, Dahlin T, Johansson S, Loke MH. Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam. Journal of Applied Geophysics, 2008, 65 (3–4), 155–164 p.

Положительная рецензия от
Решение редколлегии о публикации от

ОБ АВТОРЕ



ВЕЛИКИН
Сергей Александрович

Окончил МГРИ в 1975 г., начальник Вилуйской научно-исследовательской станции института Мерзлотоведения СО РАН к.т.н. Специалист в области геофизики криолитозоны, автор и соавтор более 80 научных публикаций, 9 изобретений и 2-х монографий. Область научных интересов – экспериментальные и теоретические исследования, связанные с разработкой методики и техники геофизического мониторинга геокриологической среды для решения задач, связанных с освоением и эксплуатацией горных пород криолитозоны, оснований инженерных и гидротехнических сооружений (инженерная геофизика, мерзлотоведение, экология).