

УДК 550.837.3 + 550.8.08 + 627.8.06

## ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ПЛОТИНЫ С ДИАФРАГМОЙ: СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ И ТОКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2021 г. П.А. Казначеев<sup>1</sup>, Д.А. Ушаков<sup>2</sup>, А.Н. Камшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

*Автор для переписки: П.А. Казначеев (e-mail: p\_a\_k@mail.ru)*

Применение геофизических методов для инженерно-геологического исследования гидротехнических сооружений (прежде всего, плотин и дамб на стадии строительства) важно для определения физико-механических характеристик материалов сооружений. Отклонение характеристик материалов от проектных, их изменение и деградация отдельных элементов могут нарушать устойчивую работу сооружений. Критические нарушения структуры последних могут быть связаны с ненормативными фильтрационными потоками и быть опасными для функционирования и целостности сооружений. Особенно опасны нарушения противифльтрационных элементов.

Электроразведочные (электрометрические) методы геофизики подходят для выявления и отслеживания таких нарушений, если присутствует большой контраст удельных электрических сопротивлений грунтовых частей плотины и противифльтрационных элементов. Это условие выполняется для противифльтрационных элементов из слабопроводящих электрический ток материалов, к которым относятся экраны и диафрагмы. Для диафрагм исследование геофизическими методами более актуально, чем для экранов, так как первые находятся внутри тела плотины и прямой доступ к ним затруднен.

Для плотины с диафрагмой, сплошность которой нарушена вырезом, была составлена геоэлектрическая модель, определены конфигурации электрометрических установок традиционных электродных (электротомография) и токовых измерений с помощью измерителей тока. Задача заключалась в обнаружении выреза и оценке его размеров. Установка электротомографии размещалась вдоль тела плотины на гребне. Токовая установка из подвижного излучающего электрода и измерителя тока располагалась в воде со стороны верхнего бьефа.

На основе численного моделирования получено распределение электрического поля в модели, данные измерений для установки электротомографии и для токовой установки. Показано, что наблюдаются напрямую связанные с вырезом в диафрагме аномалии, форма, размер и величина которых при электротомографии затрудняют прямую идентификацию выреза, но могут быть калиброваны на анализе множества моделей. При токовых исследованиях выявлено, что форма, величина и размер аномалии явным образом соответствуют вырезу в диафрагме. Определены зависимости измеряемой величины от ширины и положения выреза, позволяющие технологически эффективно идентифицировать наличие выреза и оценить его параметры. При сравнении данных электротомографии и токовых измерений установлено, что методы могут успешно дополнять друг друга.

**Ключевые слова:** электрометрия, электротомография, плотины, диафрагма, противифльтрационный элемент, электродные измерения, токовые измерения.

### Введение

Гидротехнические сооружения представляют собой сложные искусственные объекты, тесно связанные с природной средой. Их главное назначение – изменение потоков или удержание больших объемов воды или других жидкостей. Наиболее

распространенные типы гидротехнических сооружений – дамбы и плотины, широко используемые при создании водохранилищ, хвостохранилищ, гидроэлектростанций, мелиоративных сооружений и др. Плотины и дамбы имеют сложную структуру, позволяющую, с одной стороны, блокировать водные потоки, а с другой – быстро, эффективно и экономично вести строительство [Телешев и др., 2012]. Поэтому большая часть тела плотины обычно принимает на себя нагрузку веса воды и самой плотины, а отдельные элементы выполняют функцию блокирования потока воды. К плотинам такого типа относятся грунтовые плотины с противофильтрационными элементами.

Аварии на гидротехнических сооружениях, и конкретно – на плотинах и дамбах, приводят к крупным человеческим жертвам и наносят серьезный экономический ущерб. К первой группе причин аварий относятся природные стихийные бедствия, такие как землетрясения, оползни и критические погодные условия, ко второй – человеческий фактор. Как правило, аварии по причине стихийных бедствий происходят внезапно и быстро. Широко известен случай прорыва дамбы Баньцао (Китай, 1975 г.) в результате выпадения за одни сутки более чем годовой нормы осадков и перелива воды через плотину, который привел к разрушению тела указанной плотины в виде широкой брешы. Последующее увеличение потока воды повлекло за собой разрушение каскада гидротехнических сооружений в провинции Хэньань ниже по течению [Zhong, Chen, Deng, 2018].

Еще одна группа причин аварий на плотинах – изменение структуры сооружения при эксплуатации. Примерами крупных аварий на грунтовых плотинах по этим причинам могут служить разрушение плотины водохранилища Тетон (штат Айдахо, США, 1976 г.) [Arthur, 1976; Smalley, 1992] и дамбы хвостохранилища завода *MAL Hungarian Aluminum* [Zanbak, 2010; Orman et al., 2011]. Наиболее существенной силой изменения структуры плотин при этом оказывается неконтролируемая фильтрация через грунты тела и основания плотины.

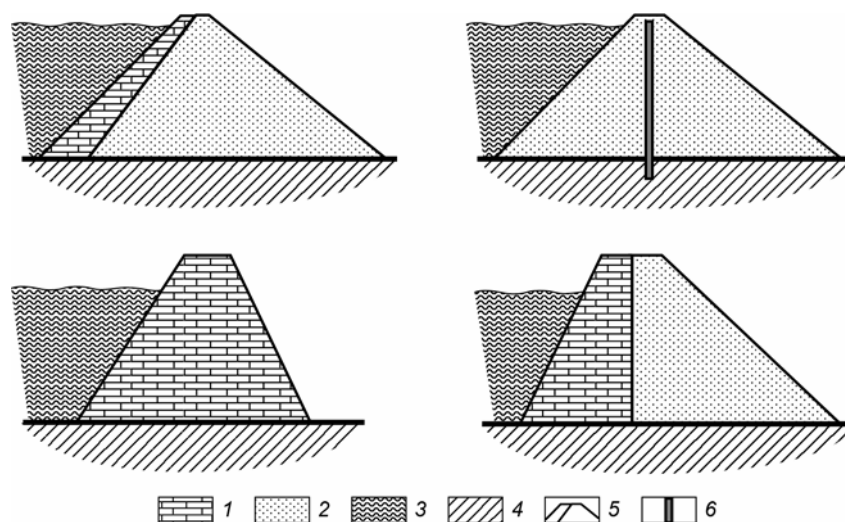
Существуют разные методы оценки суммарного объема фильтрации (через разность контролируемого прихода и расхода воды в водохранилище) и поиска зон фильтрации, среди которых подкрашивание воды, маркирование изотопами или идентификация по исходному составу [Рекомендации ..., 1984; СТО 70238424.27.140.003-2010..., 2010; Käss, 2018; Özdemir, 2019]. В монолитных (например, железобетонных) плотинах предусматриваются специальные каналы и смотровые штреки для выявления ненормативной фильтрации [СТО 70238424.27.140.003-2010..., 2010]. Для контроля грунтовых плотин используются визуальные (поиск водопроявлений), геодезические (оценка просядков) и гидрологические (обнаружение изменения уровня грунтовых вод) методы [П 72-2000..., 2000; СТО 70238424.27.140.003-2010..., 2010; Осика и др., 2017]. Но поиск причин неконтролируемой фильтрации, т.е. выявление и контроль нарушений противофильтрационных элементов, остается важной проблемой. Сама по себе неконтролируемая фильтрация, даже если не приводит к аварийной ситуации, влечет за собой экономический ущерб в виде потери мощностей и повышенного износа сооружения. Поэтому обнаружение зон повышенной фильтрации, связанных с нарушениями противофильтрационных элементов, для обеспечения устойчивой и безопасной работы гидротехнических сооружений остается актуальной задачей.

Разовый контроль состояния противофильтрационных элементов необходим для диагностики, а оперативный – для отслеживания состояния сооружения в целях обеспечения его нормальной работы и минимизации последствий или предотвращения возможных разрушений, аварий и экологического ущерба. Часть противофильтрационных элементов (например, экраны) доступна для контроля относительно простыми методами, включающими визуальное наблюдение [СТО 70238424.27.140.003-2010..., 2010].

Но наибольший интерес представляют геофизические методы, позволяющие проводить неразрушающий контроль состояния сооружений и независимые от того, были ли предусмотрены в исходной конструкции средства для обнаружения фильтрации.

Геофизические методы инженерно-геологической направленности широко применяются для определения и контроля структуры искусственных сооружений, в том числе гидротехнических [Wodajo, Hickey, Brackett, 2019]. Они дают возможность выявить отклонения структуры от проектной, ее изменение и деградацию отдельных элементов. К активно используемым методам относятся методы электроразведки, в частности – электротомография (см., например, [Макаров, Модин, 2013; Loperte, Soldovieri, Lapenna, 2015; Olenchenko, Osipova, 2020]). Указанные методы хорошо разработаны и позволяют оценить структуру гидротехнического сооружения при высоком контрасте электрических свойств насыщенных и ненасыщенных водой грунтовых частей сооружения.

Виды конструкций плотин в зависимости от типа противофильтрационного элемента подробно описаны в [Телешев и др., 2012] и приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** Виды конструкций плотин по [Телешев и др., 2012]. Вверху: набросная с экраном из кладки, бетона или пластика (слева); набросная с диафрагмой или ядром (справа). Внизу: цельная из кладки или бетона (слева); полунабросная с напорной стенкой из кладки или бетона (справа). 1 – кладка или бетон, 2 – набросный грунт, 3 – вода со стороны верхнего напорного бьефа, 4 – грунты основания, 5 – гребень плотины, 6 – диафрагма или ядро. Уровень воды со стороны нижнего бьефа не показан

**Fig. 1.** Types of dam structures according to [Teleshev et al., 2012]. Above: fill dam with screen made of masonry, concrete or plastic (on the left); fill dam with diaphragm or core (on the right). Below: mass dam made of masonry or concrete (on the left); half fill dam with mass upstream face made of masonry or concrete (on the right). 1 – masonry or concrete, 2 – filling soil, 3 – water from upstream side, 4 – foundation soils, 5 – top of the dam, 6 – diaphragm or core. Water level from downstream side is not shown

Если противофильтрационный элемент представляет собой ядро из глинистых грунтов или суглинков, то контраст электропроводности может быть мал, так как названные породы обладают удельным электрическим сопротивлением, сопоставимым с сопротивлением воды и водонасыщенных насыпных пород, как правило, образующих борта плотины [Огильви, 1990]. В таком случае электрометрическое обнаружение нарушения затруднено.

Другая ситуация возникает, когда противодиффузионный элемент представляет собой контрастный по электрическим свойствам объект – экран или диафрагму [Телешев и др., 2012]. Экран может быть изготовлен из пластмассовых пленок (например, полиэтилена) и расположен на поверхности борта плотины со стороны верхнего бьефа. Такой экран обладает и противодиффузионными, и электроизолирующими свойствами. То же относится и к диафрагме, размещенной в центре тела плотины и изготовленной из материалов на основе смол (битумы, асфальт, асфальтобетон и др.). Но если экран доступен для обследования простыми методами, то к диафрагме прямого доступа нет. В таком случае для обнаружения нарушений сплошности и зон деградации диафрагмы необходимо привлечение дистанционных методов, в том числе методов электроразведки.

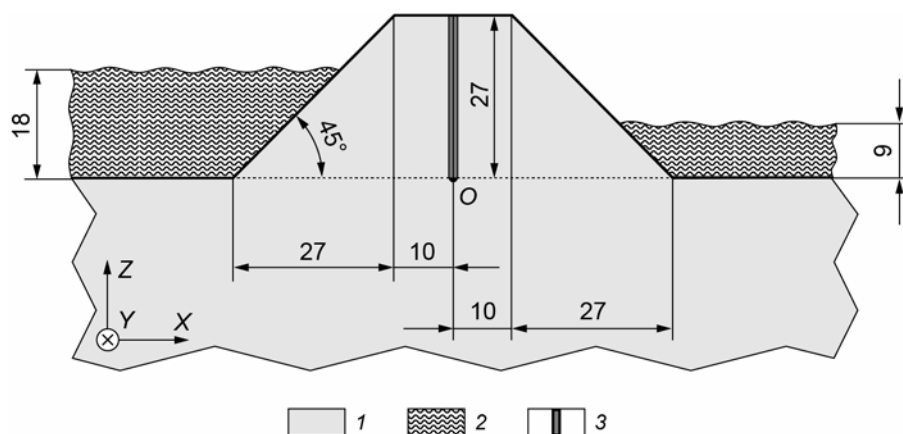
Существующие методы электроразведки не всегда позволяют получить достаточную информацию о состоянии подобных объектов. Одно из препятствий состоит в том, что исследования обычно проводятся на доступной сухой части гидротехнического сооружения, например, на гребне тела каменно-набросной плотины. Удельные сопротивления сухой каменной или грунтовой-каменной части плотины очень высоки, что затрудняет возбуждение и измерение электрического поля. С другой стороны, исследование плотины в поперечном сечении проблематично из-за необходимости размещения электродов и на грунтовой ее части, и в воде. При этом следует учитывать сложную форму подобных объектов и сопряженной части среды, включающей в себя рельеф дневной поверхности, и динамический характер этой формы (например, из-за изменения уровня воды). Электрометрические измерения возможны в водной среде вдоль тела плотины, но при использовании традиционных методов (например, электротомографии) трудно оценить геоэлектрический разрез в стороне от профиля установки. Кроме того, применение указанных методов осложнено вблизи обслуживающих плотину технических элементов.

Измерение электрического поля в водной (жидкой) среде возможно и успешно проводится с помощью традиционных измерительных электродных пар. Однако такие исследования на низких частотах предполагают гальванический контакт электрода со средой и обладают рядом недостатков. Первый из них – возникновение контактных явлений на границе электрод–среда, второй – наличие двух разнесенных в пространстве электродов для определения разности потенциалов, тогда как необходимо знать электрическое поле в одной точке среды. Поэтому нами было предложено использовать для электрометрического контроля гидротехнических сооружений измерение электрического поля с помощью бесконтактных измерителей тока [Kamshilin, Kaznacheev, 2018]. Один измеритель тока позволяет определить одну электрическую величину (плотность электрического тока) практически в одной точке среды (точнее – в локальной области около себя) и исключает возникновение любых контактных явлений.

Задача настоящей работы заключалась в рассмотрении возможности применения измерителей тока для обследования плотин на предмет нарушения сплошности диафрагм и сравнении результатов традиционных электродных измерений и измерений с помощью измерителей тока.

### Методика

Для расчета определяемых величин и сравнения методов исследования на основе классификации плотин, предложенной в [Телешев и др., 2012], была построена геоэлектрическая модель плотины с диафрагмой в виде тонкой непроводящей пластины (рис. 2). Модель состоит из двух частей – грунтовой (тело плотины и ее основание) и водной (вода в верхнем и нижнем бьефах).



**Рис. 2.** Геоэлектрическая модель плотины с диафрагмой с изолирующими свойствами. 1 – грунтовый материал основания и тела плотины с удельным электрическим сопротивлением  $\rho_1$ ; 2 – вода с удельным сопротивлением  $\rho_2$ ; 3 – диафрагма. Здесь и на рис. 4 XYZ – направления осей используемой системы координат; O – центр модели; выносными линиями показаны размеры элементов модели, м

**Fig. 2.** The geoelectric model of the dam with diaphragm with insulating properties: 1 – soil of foundation and body of the dam with resistivity  $\rho_1$ ; 2 – water with resistivity  $\rho_2$ ; 3 – diaphragm. Here and in Fig. 4 XYZ are directions of the axes of the used coordinate system; O is center of the model; the extension lines show dimensions of model elements, m

Предложенная модель плотины имеет несколько особенностей.

1. Выбраны конкретные значения размеров элементов плотины, характерные для подобных сооружений по порядку величины (см. рис. 2).

2. Удельное электрическое сопротивление грунтового материала основания и тела плотины ( $\rho_1$ ) принято за 1 Ом·м как фоновое сопротивление вмещающего полупространства. При заданном контрасте сопротивлений расчетные значения по модели могут быть пересчитаны к другим значениям удельных сопротивлений.

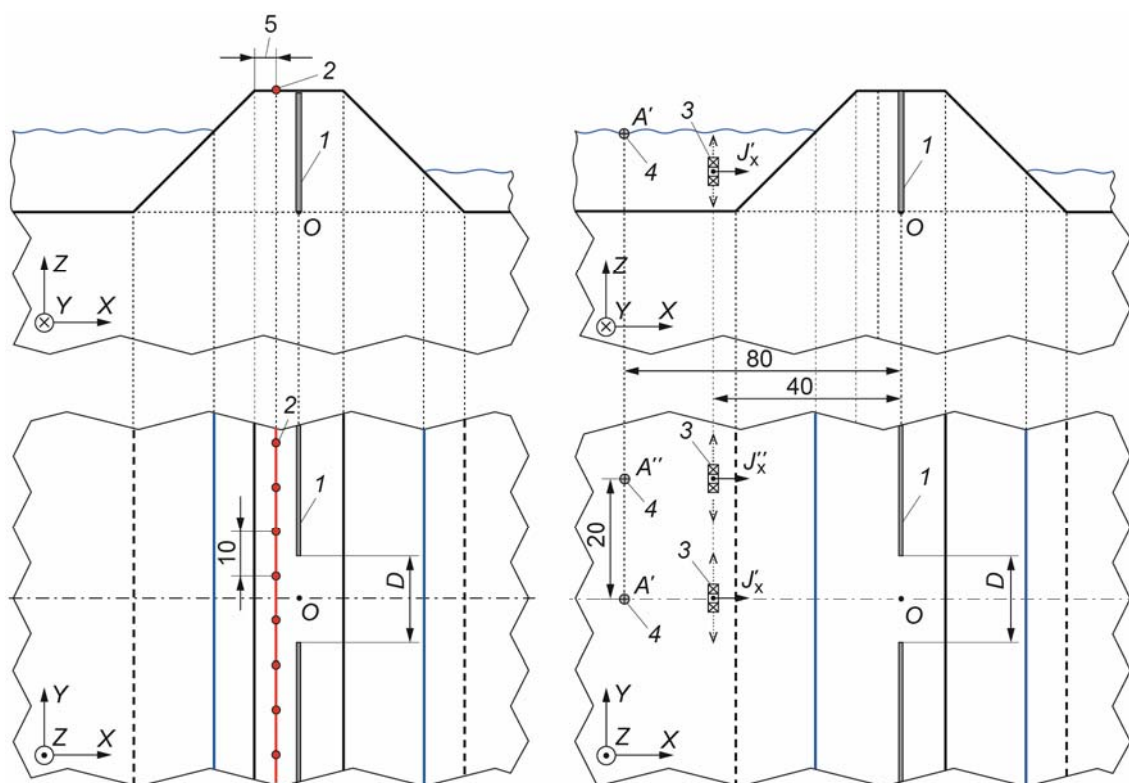
3. Удельное электрическое сопротивление воды ( $\rho_2$ ) принято равным значению 0.1 Ом·м, близкому к реальному [Огильви, 1990]. При этом  $\rho_2 \ll \rho_1$ , что можно рассматривать как худший случай с точки зрения электрометрического обследования. Меньшее сопротивление воды предполагает сильное растекание тока в воде, что уменьшает определяемые величины при электротомографии и токовом обследовании. Успешное решение задачи для худшего случая позволит решить ее же при  $\rho_2 \gg \rho_1$ , когда измеряемые величины будут существенно больше.

4. Контраст удельных электрических сопротивлений для воды и материала плотины предполагается на порядок большим, чем контраст сопротивлений разных частей плотины. Иначе говоря, сопротивления тела и основания плотины считались одинаковыми. Это возможно, если они состоят из грунтово-каменных смесей.

5. Уровни воды в верхнем и нижнем бьефах фиксировались и принимались за 2/3 и 1/3 от высоты тела плотины, что соответствует одному из вариантов перепада высот уровней воды при расчетах filtrаций [СП39.13330.2012..., 2012].

6. Нарушение противотрационного элемента имело вид выреза в диафрагме заданной ширины  $D$  (рис. 3), которая варьировалась при расчетах и составляла 1, 2, 5, 10, 20, 50 м.

Установка электротомографии из 24 электродов располагалась на гребне плотины несколько в стороне от ее оси, и симметрично относительно выреза в диафрагме в направлении вдоль тела плотины (см. рис. 3, слева).



**Рис. 3.** Схема электротомографического (слева) и токового (справа) обследования и вид на модель с установками в разрезе (вверху) и в плане (внизу). Синими линиями обозначены уровни уреза воды в верхнем и нижнем бьефах; толстыми черными штриховыми линиями – пересечение склона плотины и дна бьефов; тонкими стрелками с пунктиром – перемещение измерителя тока в плоскости, параллельной плоскости  $YZ$ ; черными жирными стрелками – измеряемая  $x$ -составляющая вектора плотности тока  $J_x$ . 1 – диафрагма с вырезом шириной  $D$ ; 2 – электроды установки электротомографии; 3 – измеритель тока  $J_x$ ; 4 – излучающий электрод  $A$  токовой установки.  $A'$ ,  $A''$  и  $J'_x$ ,  $J''_x$  – два варианта положения излучающего электрода и измерителя тока

**Fig. 3.** The diagram of the electrical resistivity tomography (on the left) and the current examination (on the right) and view of the model with setups in section (above) and in plan (below). Blue lines indicate the water levels in the upstream and downstream wall; thick black dashed lines – intersection of the slope of the dam and the bottom of the reservoirs; thin dotted line with arrows shows the movement of the current gauge in plane parallel to  $YZ$  plane; black bold arrows – the measured  $x$ -component of the current density vector  $J_x$ . 1 – the diaphragm with the cutout of width  $D$ ; 2 – electrodes of the electrical resistivity tomography setup; 3 – the current gauge measuring  $J_x$ ; 4 – the current electrode  $A$  of the current setup.  $A'$ ,  $A''$  and  $J'_x$ ,  $J''_x$  – two variants of position of the current electrode and the current gauge

Токовая установка располагалась в водной части сооружения со стороны верхнего бьефа и состояла из излучающего электрода  $A$  (второй излучающий электрод  $B$  отнесен на бесконечность) и измерителя тока, определяющего перпендикулярную телу плотины  $x$ -составляющую вектора плотности тока  $J_x$  в водной среде (см. рис. 3, справа).

Выбор такой конфигурации установок обусловлен следующими технологическими соображениями. Положение установки электротомографии при размещении поперек тела плотины стационарно, так как часть электродов размещается на грунтовом теле плотины, часть в верхнем бьефе и часть – в нижнем. При расположении установки вдоль тела плотины (см. рис. 3, слева) охватываемая исследованием область больше и, следовательно, больше вероятность попасть на вырез в диафрагме. Шаг между электродами

равен 10 м, что сопоставимо с типовым шагом и характерными размерами элементов плотины. Вырез помещен посередине установки электротомографии, чтобы упростить вычисления за счет наличия симметрии.

В токовой установке измерители тока мобильны при размещении в воде и могут определять плотность тока  $J_x$ , протекающего от излучающего электрода в направлении тела плотины. Наиболее информативно и одновременно наименее затратно измерение распределения  $J_x$  в плоскости, параллельной телу плотины и, соответственно, диафрагме (плоскость  $YZ$  на рис. 3, *справа*). При этом осуществляются площадные измерения для плоскости  $YZ$ , удаленной от электрода  $A$  на выбранное расстояние.

Для описанной модели было выполнено численное моделирование по методике [Казначеев, 2014; Казначеев и др., 2019], получено распределение электрического поля и значения измеряемых величин. Затем для установки электротомографии были найдены значения потенциалов измерительных электродов и определены входные данные для программы *Res2DInv*. В этой программе была проведена инверсия данных электротомографии и получен восстановленный геоэлектрический разрез.

Для токовой установки были получены значения плотности тока  $J_x$  для некоторой области плоскости  $YZ$  в виде распределения (карты)  $J_x$ . Кроме того, карты  $J_x$  были построены для разных положений излучающего электрода  $A$  относительно центра выреза – при его смещении на 0, 10, 20, 50 м относительно центра выреза в направлении вдоль тела плотины. В качестве примера на рис. 3, *справа внизу* показано два положения излучающего электрода  $A'$  и  $A''$  и два соответствующих стартовых положения измерителя тока, определяющего плотности тока  $J'_x$  и  $J''_x$ .

Непосредственно анализировалась не сама измеренная плотность тока  $J_x$ , а ее отклонение от “нормы” (когда влияние выреза минимально) в виде дифференциальной величины

$$\Delta J = J_x^{ref} - J_x, \quad (1)$$

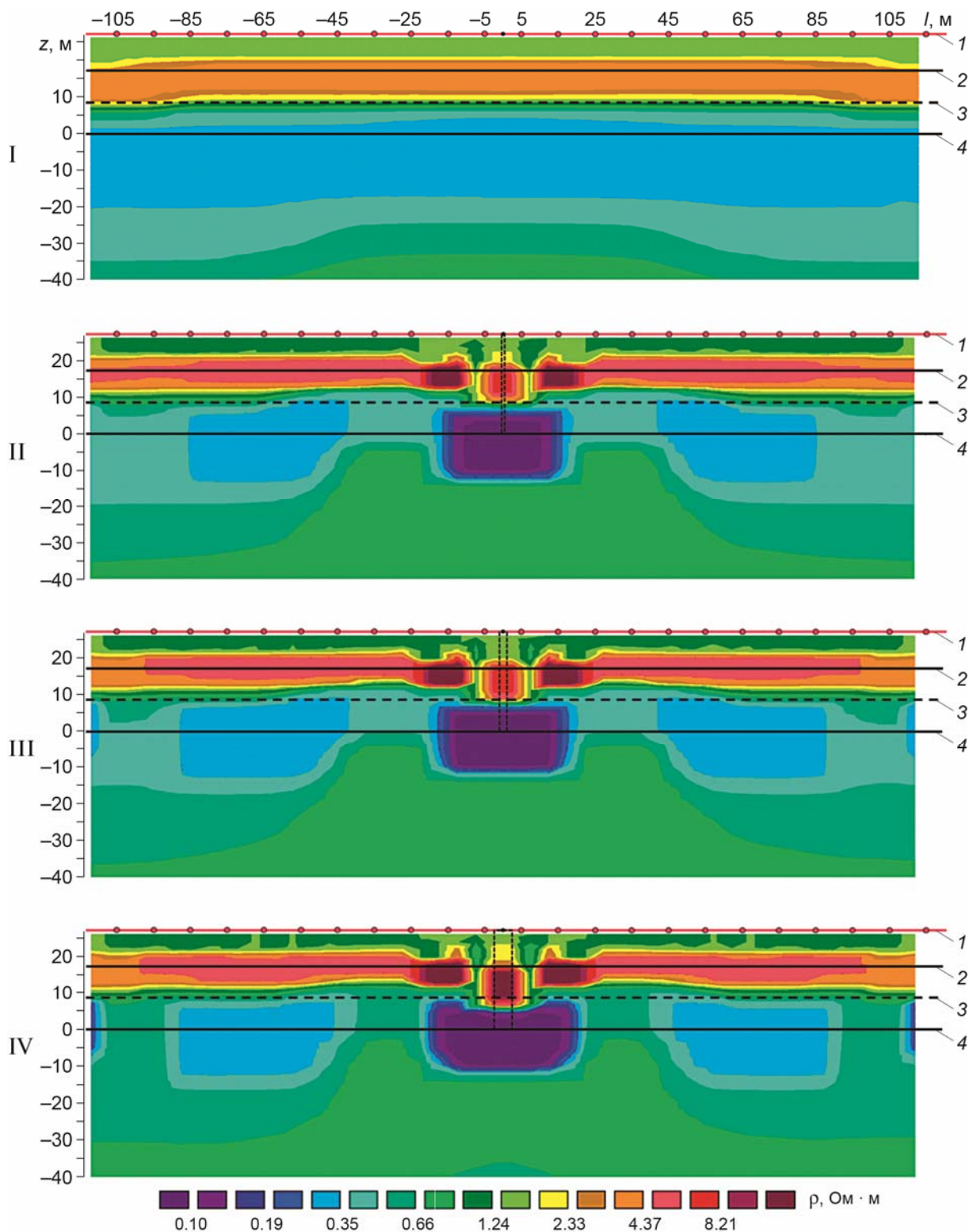
где  $J_x$  и  $J_x^{ref}$  – плотности тока, полученные для каждого положения измерителя тока в плоскости  $YZ$  (см. рис. 3, *справа*) при текущем фиксированном положении излучающего электрода  $A$  относительно выреза ( $J_x$ ) и при расположении излучающего электрода на существенном удалении от выреза ( $J_x^{ref}$ ). Разность  $\Delta J$  определяется по (1) для значений  $J_x$  и  $J_x^{ref}$ , измеренных в одинаковых точках плоскости  $YZ$  относительно излучающего электрода  $A$ , при токе излучающего электрода равном одному амперу, и может быть легко нормирована к нему.

## Результаты

Восстановленный геоэлектрический разрез для установки электротомографии показан на рис. 4 последовательно для случаев с диафрагмой без выреза, с диафрагмой с вырезом разной ширины и без диафрагмы.

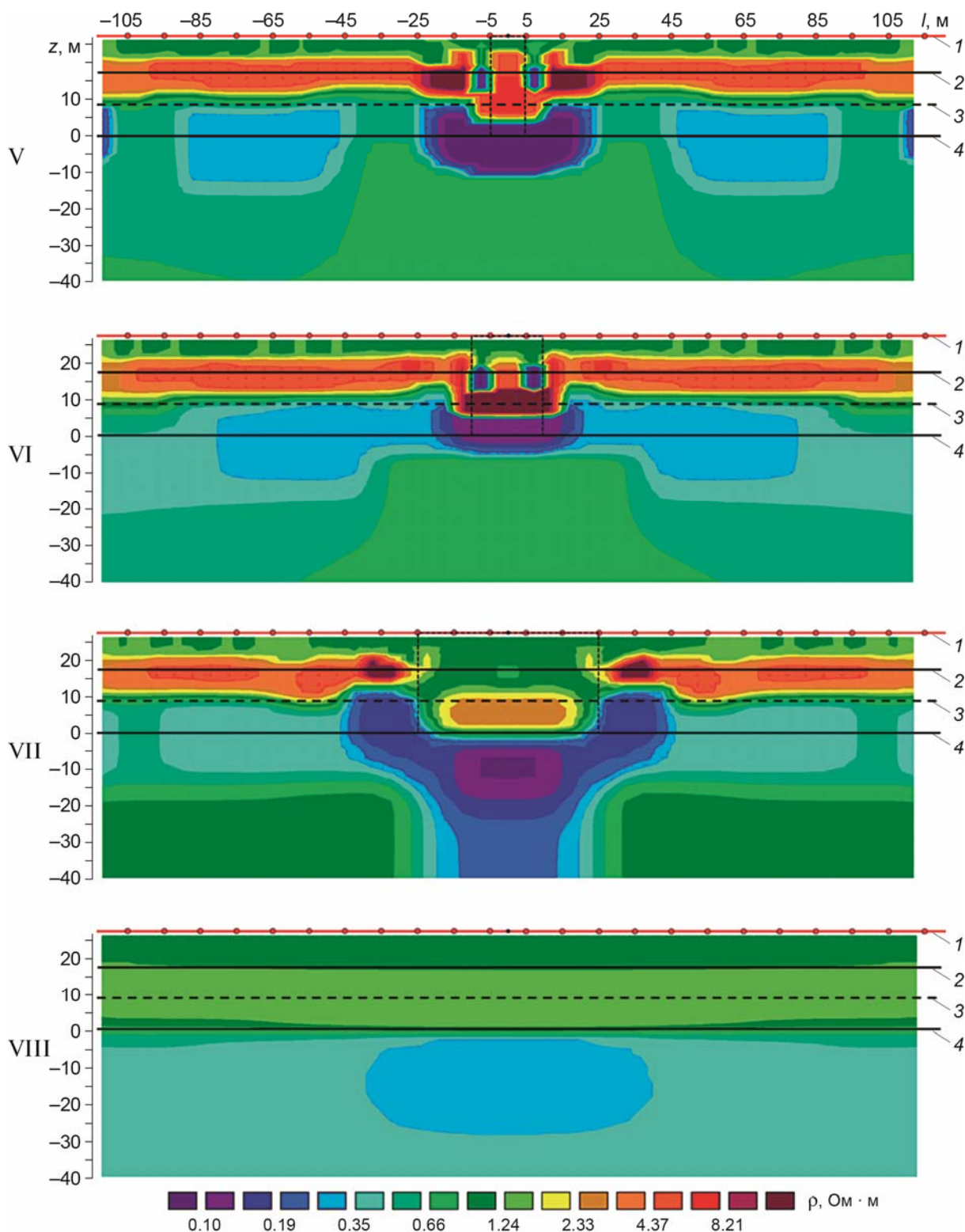
Отметим, что разрез представляет собой кажущуюся картину распределения удельного электрического сопротивления, так как инверсия в программе *Res2DInv* проводилась для  $2D$ -модели, однородной в поперечном к плоскости разреза направлении. Для полноценной трехмерной инверсии необходимы площадные электротомографические измерения, которые не рассматривались в настоящей работе.

В то же время в электроразведочной практике часто встречаются задачи, когда приходится ограничиваться анализом данных по одному или нескольким профилям, не дающим полной  $3D$ -картины удельного электрического сопротивления (см., например, [Модин и др., 2015]).



**Рис. 4.** Результаты инверсии данных электротомографии по профилю вдоль тела плотины: I – с диафрагмой без выреза; II–VII – с диафрагмой с вырезом шириной 1, 2, 5, 10, 20, 50 м соответственно; VIII – без диафрагмы. На вертикальных осях – высота ( $z$ , м) относительно уровня дна бьефов; на горизонтальных – координата ( $l$ , м) электродов (красные кружки) вдоль профиля относительно его центра. 1–4 – уровни: гребня плотины (1); воды в верхнем (2) и нижнем (3) бьефах; дна бьефов (4). Тонкая штриховая линия – проекция положения выреза в диафрагме. Цветовая палитра отображает значения кажущегося удельного сопротивления ( $\rho$ , Ом·м)





**Fig. 4.** The results of inversion of electrical resistivity tomography data along the profile along the dam body: I – with a diaphragm without a cutout; II–VII – with a diaphragm with a cutout of width 1, 2, 5, 10, 20, 50 m, respectively; VIII – without diaphragm. On vertical axis – height ( $z$ , m) relative to the level of bottom of ponds; on horizontal axis – coordinate ( $l$ , m) of electrodes (red circles) along profile relative to its center. 1–4 – levels: top of the dam (1); water in the upstream (2) and downstream (3) ponds; bottom of ponds (4). The thin dashed line is the projection of cutout position in the diaphragm. The color palette shows values of the apparent resistivity ( $\rho$ , Ohm·m)

В случае с диафрагмой без выреза (см. рис. 4, I), как и ожидалось, не обнаруживается никаких горизонтальных неоднородностей. Резкие вертикальные изменения сопротивления коррелируют с характерными изменениями геометрии модели – возрастание сопротивления с увеличением глубины от 1.24–1.70 до 3.70–4.37 Ом·м примерно соответствует уровню воды в верхнем бьефе (прямая 2); уменьшение с 3.70–4.37 до 0.35–0.40 Ом·м – уровню воды в нижнем бьефе (прямая 3); выход на 0.30–0.35 Ом·м – уровню дна бьефов (прямая 4).

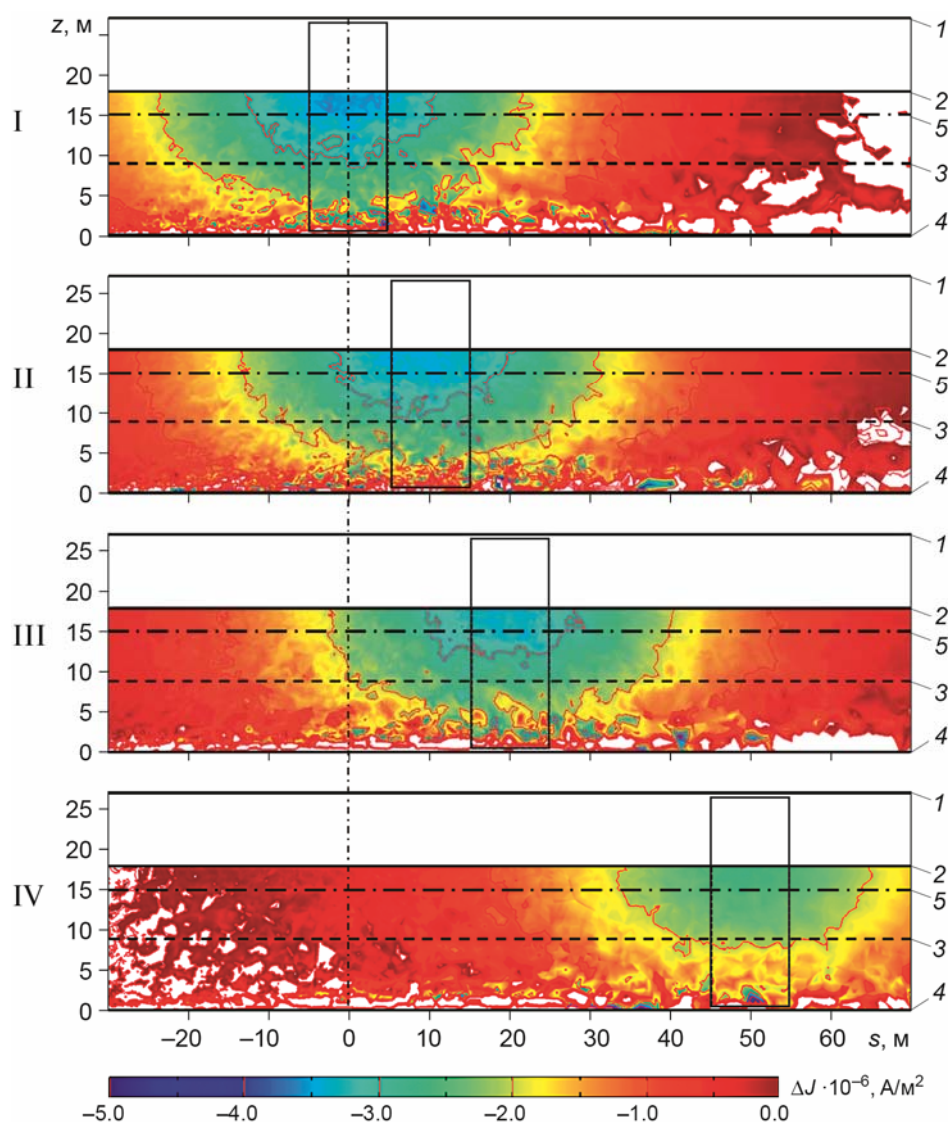
Обращает на себя внимание первое возрастание сопротивления с глубиной, вместо которого, по общим соображениям, должно было быть понижение сопротивления. По всей видимости, первая граница вызвана совместным влиянием нескольких причин, в том числе сужением тела плотины кверху, ограниченным растеканием тока в направлении поперек профиля и др. Более глубокие области сопротивлений с негоризонтальными краями обусловлены неопределенностью инверсии из-за влияния конечной длины профиля электротомографии, равной 230 м.

При рассмотрении модели с диафрагмой с вырезом (см. рис. 4, II–VII) четко прослеживается аномалия, приуроченная к центру профиля, где находится вырез. В этой области наблюдается искажение исходной горизонтально-однородной картины с некоторым повышением общего контраста сопротивлений от значений 3.70–4.37 до 0.30–0.35 Ом·м (см. рис. 4, I) и от 4.37–6.00 до 0.30–0.35 Ом·м (см. рис. 4, II–VII). Аномалия имеет специфическую форму с существенным перепадом сопротивления вдоль профиля вблизи боковых границ выреза (со значений более 11.2 Ом·м до значений менее 0.1 Ом·м), областью повышенного сопротивления напротив выреза (до 11.2 Ом·м и более) и областью пониженного сопротивления напротив нижней части выреза. Форма и размеры аномалии заметно изменяются с увеличением ширины выреза. При ширине выреза  $D$  меньше шага установки электротомографии (10 м) форма аномалии сохраняется. При дальнейшем увеличении  $D$  аномалия распространяется вниз и в бок.

Для модели без диафрагмы (см. рис. 4, VIII), которую можно рассматривать как модель с диафрагмой с очень широким вырезом, также не обнаруживается никаких горизонтальных неоднородностей. В этом случае перепады сопротивлений коррелируют с характерными изменениями геометрии модели по месту, но не по знаку – сопротивление сначала ступенчато возрастает с увеличением глубины от значений 0.90–1.24 Ом·м до 1.24–1.70 Ом·м, а затем уменьшается от 1.24–1.70 до 0.30–0.48 Ом·м. Влияния уровня воды в нижнем бьефе практически не наблюдается.

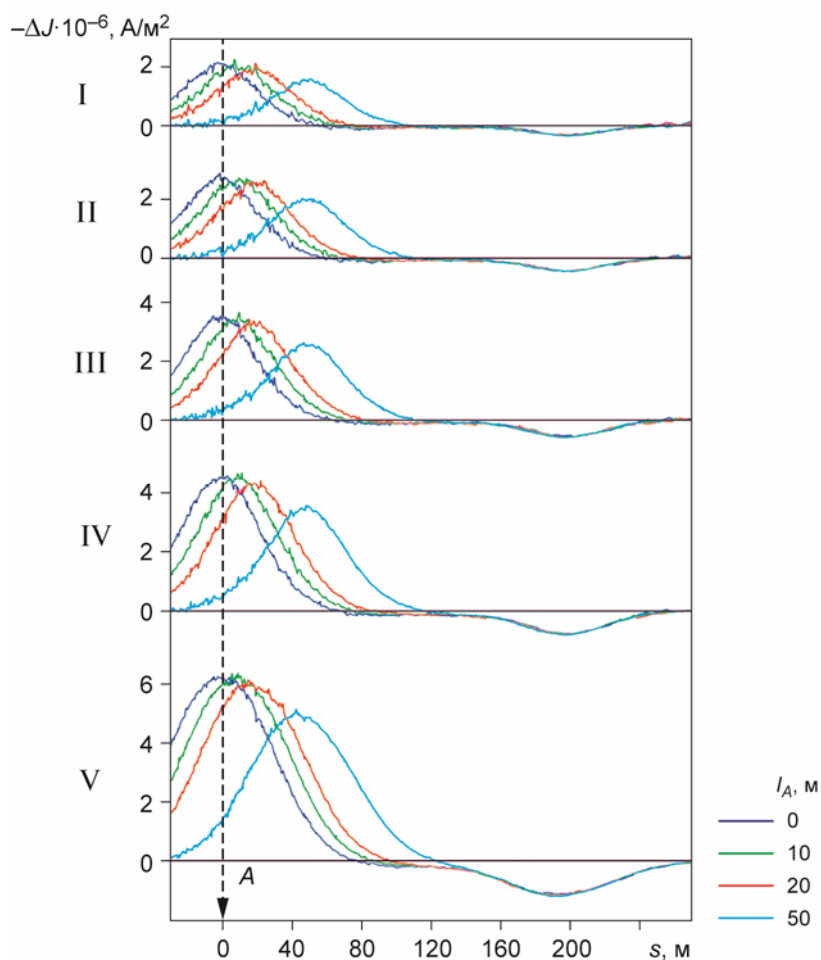
Результаты измерения плотности тока  $\Delta J$  демонстрируют плавный характер вариаций (рис. 5). Напротив расположения выреза наблюдается отрицательная аномалия  $\Delta J$ , что связано с  $J_x > J_x^{ref}$  в выражении (1), так как наличие выреза увеличивает составляющую тока  $J_x$ , протекающую через тело плотины перпендикулярно плоскости диафрагмы и выреза, по сравнению с фоновым уровнем. Центр аномалии совпадает с центром выреза; величина ее тем больше, чем ближе к излучающему электроду располагается вырез в диафрагме. Уровень воды в бьефах не влияет заметным образом на картину  $\Delta J$ ; возможно, им обусловлена несколько вытянутая в горизонтальном направлении форма аномалии.

Для количественного анализа зависимости результатов исследований от параметров модели, была выбрана линия на плоскости токовых измерений (см. рис. 5, прямая 5), вдоль которой построены графики  $-\Delta J$  в зависимости от ширины  $D$  и положения  $l_A$  выреза в диафрагме (рис. 6). Из первичного рассмотрения графиков видно, что при всех комбинациях параметров максимум аномалии соответствует центру выреза, величина аномалии  $\Delta J_{amp}$  уменьшается с увеличением расстояния между излучающим электродом и центром выреза  $l_A$ , и увеличивается с увеличением ширины выреза  $D$ .



**Рис. 5.** Результаты токовых измерений в объеме воды со стороны верхнего бьефа в вертикальной плоскости, параллельной телу плотины, при наличии выреза в диафрагме шириной 10 м при разных положениях излучающего электрода *A*: I – напротив центра выреза; II–IV – при его смещении по горизонтали относительно центра выреза на 10, 20, 50 м соответственно. На вертикальных осях – высота (*z*, м) относительно уровня дна бьефов; на горизонтальных – расстояние (*s*, м) от излучающего электрода по горизонтали (в направлении, параллельном телу плотины). Шкала снизу – значения дифференциального сигнала плотности тока ( $\Delta J$ , A/m<sup>2</sup>). 1–4 – то же, что на рис. 4; 5 – линия, для которой определены значения  $\Delta J$  на рис. 6. Черный прямоугольник – проекция положения выреза в диафрагме; тонкая вертикальная штрихпунктирная линия – проекция положения излучающего электрода *A*

**Fig. 5.** Results of current measurements in the water from the uppersteam in a vertical plane parallel to the dam body, in the presence of a cutout in the diaphragm 10 m wide at different positions of the current electrode *A*: I – opposite the center of the cutout; II–IV – when it is displaced horizontally relative to the center of the cutout by 10, 20, 50 m, respectively. On the vertical axes – the height (*z*, m) relative to the level of the pond bottom; on horizontal axes – horizontal distance (*s*, m) from the current electrode (in a direction parallel to the dam body). The scale at the bottom – the values of the differential current density signal ( $\Delta J$ , A/m<sup>2</sup>). 1–4 – the same as in Fig. 4; 5 – the line for which  $\Delta J$  values are determined in Fig. 6. Black rectangle – projection of the position of the cutout in the diaphragm; thin vertical dashed line – projection of the position of the emitting electrode *A*



**Рис. 6.** Результаты токовых измерений вдоль выбранной линии на плоскости измерения тока (см. рис. 5) для разной ширины выреза в диафрагме  $D = 2, 5, 10, 20, 50$  м (графики I–V соответственно) и разного положения проекции центра выреза ( $l_A$ , м) относительно излучающего электрода  $A$  по оси  $Y$  (см. рис. 3, *внизу справа*). На вертикальных осях – дифференциальный сигнал плотности тока ( $-\Delta J$ ,  $A/m^2$ ); на горизонтальных – расстояние ( $s$ , м) от проекции излучающего электрода  $A$  (вертикальная штриховая линия со стрелкой) до точки измерения

**Fig. 6.** Results of current measurements along the selected line on the plane of current measurement (see Fig. 5) for different cutout widths in the diaphragm  $D = 2, 5, 10, 20, 50$  m (I–V graphs, respectively) and different projection positions of the cutout center ( $l_A$ , m) relative to the emitting electrode  $A$  along the  $Y$  axis (see Fig. 3, *below right*). On vertical axes – the current density differential signal ( $-\Delta J$ ,  $A/m^2$ ); on horizontal axes – distance ( $s$ , m) from the projection of the emitting electrode  $A$  (vertical dashed line with an arrow) to the point of measurement

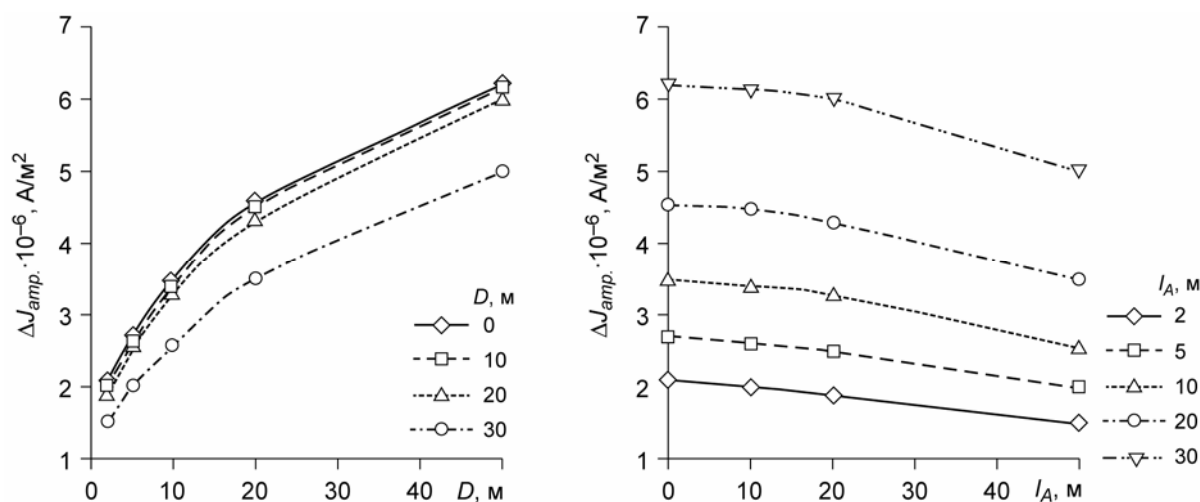
### Обсуждение

На наш взгляд, наиболее важные особенности электротомографического обследования – неоднородность восстановленного разреза вблизи границ выреза по горизонтали и ложная аномалия пониженного сопротивления, которая появляется под вырезом. На полученных разрезах не удастся выделить (выбрать) характерную горизонтальную линию для анализа количественных вариаций сопротивлений из-за резко неоднородного характера аномалии. В целом, можно предположить, что корректная интерпретация восстановленного разреза возможна, но требует отработки преобразования видимых ложных аномалий к структуре плотины. Основная причина сложной структуры этого

разреза – двумерный характер исследования по одному профилю, притом, что в рассматриваемой модели нельзя пренебречь неоднородным строением среды по всем трем измерениям.

Данные электротомографии позволяют уверенно выявить наличие выреза в диафрагме и определить положение его центра. Если ширина выреза больше шага между электродами (здесь – 10 м), то ее можно оценить приблизительно, если меньше, то сделать это практически невозможно. При этом критерием установления границ выреза является резкий перепад с повышенных значений сопротивления до пониженных значений или фонового уровня. Важное условие возможности распознавания выреза – его расположение ближе к центру установки; в этом случае минимизируется влияние краевых эффектов.

Наличие выреза надежно идентифицируется по данным токового обследования. Также прослеживается явная зависимость величины наблюдаемой аномалии  $\Delta J_{amp}$  от ширины и положения выреза, для количественной оценки которой были построены графики зависимостей амплитуды аномалии  $\Delta J_{amp}(D)$  и  $\Delta J_{amp}(l_A)$ , показанные на рис. 7.



**Рис. 7.** Зависимость амплитуды аномалии дифференциального сигнала плотности тока  $\Delta J_{amp}$ , определяемого токовым методом, от ширины выреза в диафрагме  $D$  (слева) и от положения проекции центра выреза  $l_A$  относительно излучающего электрода  $A$  по оси  $Y$  (справа)

**Fig. 7.** Dependence of the anomaly amplitude of the differential current density signal  $\Delta J_{amp}$ , determined by the current method, on the cutout width in the diaphragm  $D$  (on the left) and on the projection position of the cutout center  $l_A$  relative to the emitting electrode  $A$  along the  $Y$  axis (on the right)

Можно видеть, что  $\Delta J_{amp}$  монотонно, но нелинейно зависит от  $D$  и  $l_A$ . При малых  $D$  значение  $\Delta J_{amp}$  меняется быстро, что важно для идентификации наличия выреза небольшой ширины и оценки этой ширины. Зависимость  $\Delta J_{amp}$  от  $l_A$  более близка к линейной. С практической точки зрения это удобно, так как позволяет оценить положение и размеры выреза в диафрагме без точного позиционирования относительно него излучающего электрода  $A$ .

Сравнивая результаты электротомографического и токового обследования плотины с вырезом в диафрагме, можно сделать несколько выводов.

1. Вид аномалии в результатах инверсии данных электротомографии труднее для интерпретации и требует отдельной “калибровки” на моделях для выявления нарушений сплошности диафрагмы. В то же время есть явные закономерности в наблюдаемых аномалиях – например, границы выреза четко соответствуют смене пониженных и

повышенных значений удельного сопротивления на определенном уровне по вертикали. Сложный вид аномалии связан с неоднородным строением модели по всем трем измерениям, притом, что исследование по одному профилю электротомографии имеет 2D-характер.

2. Аномалия токовых измерений более простая по форме, ее положение и знак прямо коррелируют с вырезом, а ее размеры и величина прямо пропорциональны ширине выреза. Но для определения его размеров и положения тоже необходима отдельная “калибровка” на моделях, а получение опорного сигнала  $J_x^{ref}$  требует измерения на части плотины, значительно удаленной от нарушения сплошности.

Предварительно в рамках представленной работы можно предположить, что первоначальная оценка наличия выреза и его размеров (поиск выреза и построение первичной модели) могут технологически эффективно производиться с помощью токового метода, а подробное исследование – с помощью электротомографии после предварительной калибровки на моделях. Таким образом, возможна эффективная комбинация рассмотренных методов и взаимное дополнение получаемых результатов.

### Заключение

Инженерно-геологическое обследование гидротехнических сооружений – плотин и дамб – геофизическими методами важно для обнаружения нарушений в их структуре. Нарушения могут быть связаны с ненормативными фильтрационными потоками и быть опасными для функционирования и целостности сооружений. Особенно опасны нарушения противofильтрационных элементов, прямо предназначенных для предотвращения ненормативной фильтрации.

Электрометрические геофизические методы подходят для решения указанной задачи, если значителен контраст электрических свойств грунтовых частей плотины и противofильтрационных элементов. Это условие выполняется для противofильтрационных элементов, сделанных из слабопроводящих электрический ток материалов. К таким элементам относятся противofильтрационные экраны и диафрагмы, изготовленные из пластиковых, асфальтобетонных или битумных материалов. Экраны, как правило, располагаются на поверхности тела плотины со стороны верхнего бьефа и доступны для обследования негеофизическими методами. Для диафрагм более актуально обследование геофизическими методами, так как диафрагмы находятся в теле плотины и доступ к ним крайне затруднен.

Для плотины с диафрагмой, сплошность которой нарушена вырезом, была составлена модель геоэлектрического разреза, определены конфигурации установок традиционных электродных (электротомография) и токовых измерений с помощью измерителей тока. Задача заключалась в обнаружении выреза и оценке его размеров. Установка электротомографии располагалась вдоль тела плотины на гребне. Токовая установка из подвижного излучающего электрода и измерителя тока – в воде со стороны верхнего бьефа.

На основе численного моделирования было получено распределение электрического поля, данные для электротомографической инверсии и данные для токовой установки. Показано, что наблюдаются аномалии, напрямую связанные с вырезом. Форма, размер и величина аномалий при электротомографии затрудняют прямую идентификацию выреза, но могут быть калиброваны на анализе множества моделей. При токовых измерениях форма, величина и размер аномалии явным образом соответствуют аномалии, но для определения параметров выреза также требуется калибровка. Сравнение показывает, что с учетом технологических особенностей методов они могут взаимно дополнять друг друга.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук № МК-2223.2020.5, а также частично – в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Литература

- Казначеев П.А.* Разработка и исследование комплекса средств активного геоэлектрического мониторинга с использованием локальных измерителей тока: Дис. ... канд. техн. наук. М.: ИФЗ РАН, 2014. 227 с.
- Казначеев П.А., Попов И.Ю., Модин И.Н., Жостков Р.А.* Применение независимого конечно-элементного моделирования для оценки влияния простейших форм рельефа на результаты инверсии данных электротомографии (на примере рва треугольного сечения) // Наука и технологические разработки. 2019. Т. 98, № 1. С.21–34.
- Макаров Д.В., Модин И.Н.* Электрометрические исследования насыпной плотины в зоне вечной мерзлоты: первый этап мониторинга // Инженерные изыскания. 2013. № 10-11. С.116–121.
- Модин И.Н., Большаков Д.К., Бомкин С.В., Скобелев А.Д., Баранчук К.И., Ефремов К.Д., Пелевин А.А., Репьев А.С.* Построение объемной модели верхней части геологической среды по данным электротомографии для решения инженерно-геологических задач // Geomodel 2015 – 17th science and applied research conference on oil and gas geological exploration and development. Conference Proceedings. 2015. Т. 2015, ср-448-00019. С.1–11. DOI: 10.3997/2214-4609.201412239
- Огильви А.А.* Основы инженерной геофизики. М.: Недра, 1990. 501 с.
- Осика В.И., Кочетков Б.М., Павлов Е.И., Качан И.П.* Мониторинг деформационного состояния ответственных и технически сложных объектов // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 1. С.46–52.
- П 72-2000. Рекомендации по проведению визуальных наблюдений и обследований на грунтовых плотинах. СПб.: ВНИИГ, 2000. 72 с.
- Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 78 с.
- СТО 70238424.27.140.003-2010. Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. М.: НП «ИНВЭЛ», 2010. 218 с.
- Телешев В.И., Ватин Н.И., Марчук А.Н., Комаринский М.В.* Производство гидротехнических работ. Ч. 1: Общие вопросы строительства. Земляные и бетонные работы. М.: Изд-во АСВ, 2012. 496 с.
- Arthur H.G.* Teton Dam Failure // The Evaluation of Dam Safety (Engineering Foundation Conference Proceedings, Asilomar, Nov. 28 – Dec. 3, 1976), American Society of Civil Engineers. New York, 1976. P.61–71.
- Kamshilin A.N., Kaznacheev P.A.* Local current gauge: Instrument for geoelectric measurements // Seismic Instruments. 2018. V. 54, N 5. P.573–578. DOI: 10.3103/S0747923918050079.
- Käss W.* Tracing Technique in Geohydrology. Boca Raton: CRC, 2018. 602 p.
- Loperte A., Soldovieri F., Lapenna V.* Monte Cotugno dam monitoring by the electrical resistivity tomography // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. V. 8, N 11. P.5346–5351.

- Olenchenko V.V., Osipova P.S.* Electrical Resistivity Tomography of the Frozen Embankment Dam // Engineering and Mining Geophysics 2020, Sep. 2020, Conference Proceedings. 2020. V. 2020. P.1–8. DOI: 10.3997/2214-4609.202051007
- Orman L., Zardari M., Mattson H., Bejelkevik A.* Numerical analysis of curved embankment of an upstream tailings dam // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2011. V. 16, N 1. P.931–944.
- Özdemir A.* Defining groundwater resource protection zones in aquifers using stable isotope analysis: a case study from the Namazgah Dam Basin in Turkey // Environ. Earth. Sci. 2019. V. 78, N 509. P.1–18. DOI: 10.1007/s12665-019-8514-7
- Smalley I.* The Teton Dam: rhyolite foundation + loess core = disaster // Geology Today. 1992. N 8. P.19–22. DOI: 10.1111/j.1365-2451.1992.tb00347.x
- Wodajo L.T., Hickey C.J., Brackett T.C.* Application of Seismic Refraction and Electrical Resistivity Cross-Plot Analysis: A Case Study at Francis Levee Site // Levees and Dams: Advances in Geophysical Monitoring and Characterization cover / Eds. J. Lorenzo, W. Doll. Cham: Springer, 2019. P.23–40.
- Zanbak C.* Failure mechanism and kinematics of Ajka tailings pond incident 4th October 2010 // Turkish Chemical Manufacturers Association Seminar, Istanbul, Turkey 2010. URL: <http://www.wisouranium.org/mdafko.html>
- Zhong Q., Chen S., Deng Z.* A simplified physically-based model for core dam overtopping breach // Engineering Failure Analysis. 2018. V. 90. P.141–155. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.03.032

#### Сведения об авторах

**КАЗНАЧЕЕВ Павел Александрович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-40. E-mail: p\_a\_k@mail.ru

**УШАКОВ Дмитрий Александрович** – студент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел.: +7(499) 254-23-40. E-mail: ushakov.da18@physics.msu.ru

**КАМШИЛИН Анатолий Николаевич** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-30-15. E-mail: kamshilin@ifz.ru

## THE ELECTROMETRIC STUDY OF DAM WITH DIAPHRAGM: COMPARISON OF ELECTRODE AND CURRENT MEASUREMENT ON MODELLING DATA

P.A. Kaznacheev<sup>1</sup>, D.A. Ushakov<sup>2</sup>, A.N. Kamshilin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*Corresponding author: P.A. Kaznacheev (e-mail: p\_a\_k@mail.ru)*

**Abstract.** The use of geophysical methods for geological engineering exploration of hydraulic facilities (primarily dams at the construction stage) is important for determining their physical and mechanical characteristics of the materials of structures. Deviation of characteristics of materials from design, its modification and degradation of individual elements can disrupt stable operation of facilities. Critical structural disturbances of the latter may be associated with abnormal filtration flows and may be dangerous for functioning and integrity of facilities. Malfunction of watertight element are especially dangerous.



Electrical exploration (electrometric) methods of geophysics are suitable for detecting and tracking such malfunctions if there is a large contrast between resistivity of ground parts of dam and resistivity of watertight elements. This condition is fulfilled for watertight elements made of materials that are weakly conducting electric current. These elements are screens and diaphragms. For diaphragms, study by geophysical methods is more relevant than for screens, since diaphragms are located inside body of dam and direct access to them is difficult.

For a dam with diaphragm, continuity of which is broken by a cutout, a geoelectric model was compiled. Configurations of electrometric setups of traditional electrode measurements (electrical resistivity tomography) and current measurements by a current gauge were determined. The problem was to detect the cutout and estimate its size. The tomography setup was located along the body of the dam on top. The current setup consisting of a mobile current electrode and the current gauge was located in water from upstream side.

On the basis of numerical simulation, a distribution of electric field in the model, measurement data for the tomography setup and for the current setup were obtained. It was shown that there are anomalies directly related to the cutout. The shape, size, and magnitude of the anomalies in tomography make direct identification difficult, but can be calibrated by analyzing multiple models. In current measurements, the shape, magnitude, and size of the anomaly clearly correspond to the cutout. Dependencies of measured value on width and position of the cutout were determined. These dependencies show a possibility of technologically efficient identification of presence of the cutout and evaluation of its parameters. From comparison of electrical resistivity tomography and current measurement data, it is determined that these methods can effectively complement each other.

**Keywords:** electrometry, electrical resistivity tomography, dams, diaphragm, watertight element, electrode measurements, current measurements

### Funding

The study was supported by the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists no. MK-2223.2020.5, and partially was carried out within the state assignment of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

### Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

### References

- Arthur H.G., Teton Dam Failure, in *The Evaluation of Dam Safety (Engineering Foundation Conference Proceedings, Asilomar, Nov. 28 – Dec. 3, 1976)*, Amer. Soc. of Civil Engineers, New York, 1976, pp. 61-71.
- Kaznacheev P.A., Development and study of the complex of tools for active geoelectrical monitoring using local current gauges, *Cand. Sci. (Eng.) Dissertation*, Moscow: IPE RAS, 2014, 227 p. [In Russian].
- Kaznacheev P.A., Popov I.Y., Modin I.N., Zhostkov R.A., Application of independent finite element modeling for estimating the effect of simplest landforms on results of inversion of electrical resistivity tomography data (example of a trench with the triangular cross-section), *Seismic Instruments*, 2020, vol. 56, no. 5, pp. 531-539. DOI: 10.3103/S0747923920050084
- Kamshilin A.N., Kaznacheev P.A., Local current gauge: Instrument for geoelectric measurements, *Seismic Instruments*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 573-578. DOI: 10.3103/S0747923918050079
- Käss W., *Tracing Technique in Geohydrology*, Boca Raton: CRC, 2018, 602 p.
- Loperte A., Soldovieri F., Lapenna V., Monte Cotugno dam monitoring by the electrical resistivity tomography, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, vol. 8, no. 11, pp. 5346-5351. DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2476663
- Makarov D.V., Modin I.N., Geoelectrical researching of an embankment dam in the permafrost zone: the first step of monitoring, *Inzhenernye izyskaniya (Engineering survey)*, 2013, no. 10-11, pp. 116-121. [In Russian].
- Modin I.N., Bolshakov D.K., Bomkin S.V., Skobelev A.D., Baranchuk K.I., Efremov K.D., Pelevin A.A., Repev A.S., Construction of three-dimensional model top of the geological environment according electrical resistivity tomography for geotechnical problems, in *Geomodel 2015 – 17th science and applied*

- research conference on oil and gas geological exploration and development, *Conference Proceedings, Sep 2015*, 2015, vol. 2015, cp-448-00019, pp. 1-11. [In Russian]. DOI: 10.3997/2214-4609.201412239
- Ogil'vi A.A., *Osnovy inzhenernoi geofiziki* (Fundamentals of Engineering Geophysics), Moscow: Nedra, 1990, 501 p. [In Russian].
- Olenchenko V.V., Osipova P.S., Electrical Resistivity Tomography of the Frozen Embankment Dam, in *Engineering and Mining Geophysics 2020, Sep 2020, Conference Proceedings*, 2020, vol. 2020, pp. 1-8. DOI: 10.3997/2214-4609.202051007
- Orman L., Zardari M., Mattson H., Bejelkevick A., Numerical analysis of curved embankment of an upstream tailings dam, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, vol. 16, no. 1, pp. 931-944.
- Osika V.I., Kochetkov B.M., Pavlov E.I., Kachan I.P., Monitoring of the deformation state of critically complex objects, *Nauchnoe Priborostroenie* (Scientific Instrumentation), 2017, vol. 27, no. 1, pp. 46-52. [In Russian]. DOI: 10.18358/np-27-1-i4652
- Özdemir A., Defining groundwater resource protection zones in aquifers using stable isotope analysis: a case study from the Namazgah Dam Basin in Turkey, *Environ. Earth. Sci.*, 2019, vol. 78, no. 509, pp. 1-18. DOI: 10.1007/s12665-019-8514-7
- P 72-2000. Rekomendatsii po provedeniyu vizual'nykh nablyudenii i obsledovaniy na gruntovykh plotinakh* (P 72-2000. Recommendations about carrying out visual observations and inspections on soil dams), Saint-Petersburg: VNIIG, 2000, 72 p. [In Russian].
- Rekomendatsii po statisticheskim metodam analiza odnorodnosti prostranstvenno-vremennykh kolebaniy rechnogo stoka* (Recommendations on statistical methods for analyzing the homogeneity of space-time fluctuations in river flow), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984, 78 p. [In Russian].
- Smalley I., The Teton Dam: rhyolite foundation + loess core = disaster, *Geology Today*, 1992, no. 8, pp. 19-22. DOI: 10.1111/j.1365-2451.1992.tb00347.x
- STO 70238424.27.140.003-2010. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya GES i GAES. Organizatsiya ekspluatatsii i tekhnicheskogo obsluzhivaniya. Normy i trebovaniya* (STO 70238424.27.140.003-2010. Hydrotechnical facilities of hydroelectric power plants and pumped hydro storage plants. Organization of operation and maintenance. Norms and requirements), Moscow: NP "INVEL", 2010, 218 p. [In Russian].
- Teleshev V.I., Vatin N.I., Marchuk A.N., Komarinskii M.V., *Proizvodstvo gidrotekhnicheskikh rabot. Chast 1. Obshchie voprosy stroitel'stva. Zemlyanye i betonnye raboty* (Operation of hydraulic works. Part 1. General construction issues. Earthwork and concrete work), Moscow: Izd-vo ASV, 2012, 496 p. [In Russian].
- Wodajo L.T., Hickey C.J., Brackett T.C., Application of Seismic Refraction and Electrical Resistivity Cross-Plot Analysis: A Case Study at Francis Levee Site, in *Lorenzo J., Doll W. (eds.) Levees and Dams: Advances in Geophysical Monitoring and Characterization*, Cham: Springer, 2019, pp. 23-40.
- Zanbak C., Failure mechanism and kinematics of Ajka tailings pond incident 4th October 2010, in *Turkish Chemical Manufacturers Association Seminar, Istanbul, Turkey, 2010*. URL: <http://www.wisouranium.org/mdafko.html>
- Zhong Q., Chen S., Deng Z., A simplified physically-based model for core dam overtopping breach, *Engineering Failure Analysis*, 2018, vol. 90, pp. 141-155. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.03.032

#### *About the authors*

**KAZNACHEEV Pavel Aleksandrovich** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-23-40. E-mail: p\_a\_k@mail.ru

**USHAKOV Dmitriy Aleksandrovich** – student, Lomonosov Moscow State University. Leninskie gory str., 1, GSP-1, Moscow, 119991, Russia. Ph.: +7(499) 254-23-40. E-mail: ushakov.da18@physics.msu.ru

**KAMSHILIN Anatoly Nikolayevich** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-30-15. E-mail: kamshilin@ifz.ru