

УДК 504.062:519.652:51-7

**А. Е. Куприянова**

**ЛИНЕЙНЫЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ВЕРТИКАЛЬНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ  
ПРОЕКТИРУЕМОЙ СКВАЖИНЫ ДЛЯ ДОСТУПА  
К РЕСУРСАМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

68

Поступила в редакцию 11.05.2021 г.

Рецензия от 24.06.2021 г.

*Разработан линейный алгоритм расчета вертикальной геологической структуры в заданной точке региона как вспомогательный инструмент процедуры проектирования доступа к ресурсам подземных вод московско-валдайского водоносного горизонта. Выполнена оцифровка описаний тестового набора буровых скважин на территории Калининградской области. Предложен алгоритм построения «виртуальной скважины», описывающий искомую вертикальную геологическую структуру в точке пользователя с учетом значений коэффициентов фильтрации, уровней появления воды и ее установления, дебита и других параметров реальных буровых скважин. Расчет основан на использовании данных по ближайшим к заданной точке запроса пользователя буровым скважинам. Предложенный алгоритм может позволить облегчить проектирование процедуры водоснабжения малых предприятий и персональных пользователей малых городов и поселков региона за счет ресурсов подземных вод.*

*A linear algorithm for calculating the vertical geological structure at a given point in the region has been developed as an additional tool for the design procedure to access groundwater resources of the Moscow-Valdai aquifer. The descriptions of the test set of boreholes were digitized in the Kaliningrad region. The study proposes an algorithm for constructing a "virtual well", which describes the desired vertical geological structure at the user's point, considering the values of the filtration coefficients, levels of water occurrence and its establishment, flow rate and other parameters of real boreholes. The calculation is based on the use of data on the boreholes closest to a given user request point. The proposed algorithm can facilitate the design of water supply for small enterprises and personal users of small towns and villages in the region at the expense of groundwater resources.*

**Ключевые слова:** расчетный алгоритм, разработка программного обеспечения, хозяйственно-питьевое водоснабжение, обработка геологических данных, «виртуальная скважина», подземные воды

**Keywords:** calculation algorithm, software development, drinking water supply, geological data processing, «virtual well», groundwater



## Введение

Хорошо известно, что рациональное потребление водных ресурсов хозяйствующими субъектами и обеспечение населения качественной водой являются важными факторами устойчивого развития региона. Неконтролируемая эксплуатация традиционных водных ресурсов, быстрое освоение земель, рост городских и сельских поселений приводят к истощению водных запасов, а также к ухудшению их качества за счет поступления различного рода загрязнений от бытовых и промышленных отходов [1–3].

Существующие сегодня прогнозные оценки [1; 4; 5] для водных ресурсов на Земле говорят о том, что запасов качественной воды для снабжения населения может хватить лишь на ближайшие полвека. Особенно остро проблема обеспечения питьевой водой стоит для малых городов и поселков, расположенных далеко от традиционных источников пресной воды — рек или озер [3; 6; 7]. Очевидно, что для устойчивого водоснабжения растущего населения необходимо искать все возможные способы решения этой проблемы. Одним из таких способов является хозяйственно-питьевое водоснабжение за счет подземных вод [8], доступ к которым происходит через систему скважин.

Известно [9; 10], что сегодня в городах Калининградской области более половины всего населения (в сельской местности почти все), а также около 80 % промышленных объектов для своего водоснабжения используют воды подземных горизонтов. В 2011 г. Г.С. Михневич [11] был выполнен комплексный анализ потенциала ресурса московско-валдайского межморенного водоносного горизонта, площадь распространения которого по региону достигает 70 %. Как оказалось, глубина залегания данного водоносного горизонта колеблется в диапазоне 20–70 м.

Одним из элементов водоснабжения за счет подземных вод является бурение скважины — достаточно дорогая и иногда труднореализуемая процедура [8]. Описание скважины обеспечивает пользователя информацией об особенностях вертикального геологического строения в точке бурения, что, кроме того, позволяет рассчитать защищенность подземных вод [11].

В данной работе предлагается решить задачу получения требуемого описания вертикальной геологической структуры в произвольной точке Калининградской области на основе данных уже имеющихся описаний буровых скважин [11], позволяющих получить желаемый результат с известной степенью точности.

Таким образом, основная прикладная задача исследования состоит в описании вертикальной геологической структуры в точке пользователя (образующем этап проектирования реального бурения). В качестве рабочего термина для обозначения искомого описания вертикальной геологической структуры в точке пользователя в данной работе будет использоваться термин «виртуальная скважина» (ВС) [12]. Суть задачи сводится к получению на основе модельных расчетов подробного опи-

сания искомой вертикальной геологической структуры в заданной точке и, соответственно, информации о глубине залегания водоносного горизонта.

Основная цель работы заключалась в разработке программного обеспечения для определения вертикальной геологической структуры при проектировании доступа малых предприятий и персональных пользователей к ресурсу московско-валдайского межморенного водоносного горизонта.

### Массивы данных

70

Исходными данными [11; 13; 14] для конструирования «виртуальных скважин» послужили рукописные описания тестового набора буровых скважин, ранее выполненных на территории Калининградской области (рис. 1). Общая схема информационного обеспечения задачи представлена на рисунке 1.

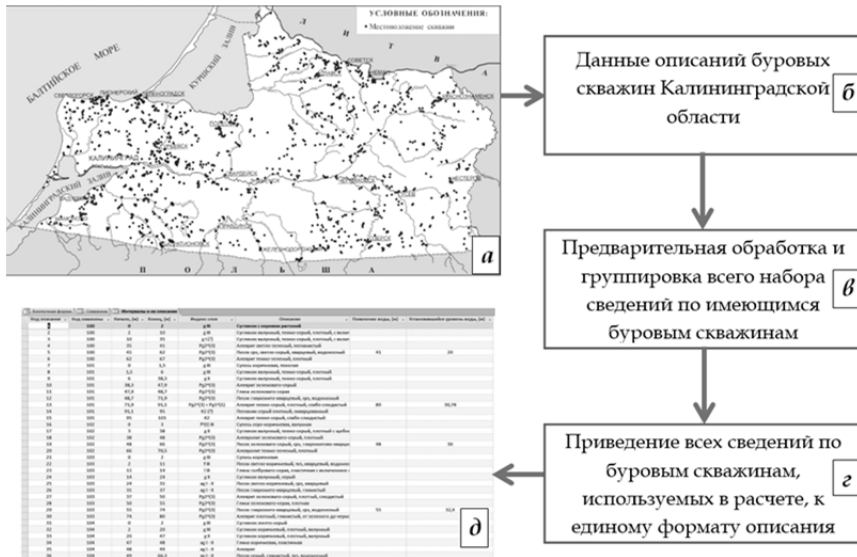


Рис. 1. Структурно-функциональная схема организации натуральных данных, опирающихся на описания буровых скважин, ранее выполненных на территории Калининградской области.

Искомая «виртуальная скважина» строится на основе экспериментальных данных по бурению (а), отраженных в описаниях буровых скважин [11] на бумажных носителях (б).

Работа с исходными данными происходила напрямую (в) путем обращения к бумажным носителям. Для преобразования описаний тестового набора буровых скважин в цифровой вид был написан алгоритм (г), приводящий исходные данные к единому формату (д)

Разработанный алгоритм на основе уже сформированных массивов данных может позволить рассчитать необходимые параметры (глубину появления подземных вод, описание геологических слоев) для определения вертикальной геологической структуры в точке пользователя.



## Оцифровка экспериментальных данных

Для решения поставленной в работе задачи исходные текстовые описания разрезов скважин необходимо было перевести в цифровой вид. Анализ бумажных носителей показал, что содержащаяся в них информация включает в себя два типа данных: (1) географические координаты расположения места отбора и (2) послойное описание геологических характеристик соответствующего интервала реальных скважин. Каждое описание буровой скважины сопровождалось присвоенным номером ID скважины, названием населенного пункта и географическими координатами. Вторая составная часть включала в себя геологические характеристики соответствующих слоев в точке бурения. Примеры такого рода сведений для одной из скважин (164-д) на территории Зеленоградского района [13; 14] приведены в таблицах 1 и 2.

71

Таблица 1

### Информация о географическом расположении скважины

Номер ID	Долгота	Широта	Название населенного пункта
164д	54° 56' 27.116"	20° 30' 40.696"	Сосновка

*Примечание:* долгота и широта указаны в формате: градусы / минуты / секунды.

Материал с описаниями послойных интервалов геологического состава буровых скважин (табл. 2) содержит сведения об абсолютной отметке (высота над уровнем моря), Н – максимальной глубине буровой скважины (м) (расположены в шапке таблицы 2), и мощности слоя (толщина, которого может составлять десятки и сотни метров), изменяющейся по геологическому составу относительно глубины залегания.

Таблица 2

### Послойное описание геологических характеристик пород для скважины с идентификационным номером 164-д [13], располагающейся в окрестности поселка Сосновка

Интервал толщины геологического слоя, м	Индекс (генетический тип и возраст отложения)	Описание литологического состава (проницаемости) слоя
<i>Абс. отметка = 1 м Н = 92 м</i>		
0,0–10,0	gIIIv	Глина валунная
10,0–12,0	ag II-III sr-v	Песок крупнозернистый
12,0–49,0	gIIsr	Глина с гравием и галькой
49,0–51,0	gIIsr	Суглинки валунные
51,0–92,0	K <sub>2</sub>	В интервале 51,0–70,0 м – песок крупнозернистый; 70,0–73,0 м – суглинок; 73,0–80,0 м песчано-гравийная смесь; 80,0–92,0 м – переслаивание мергеля и алевролита



Отсутствие унифицированных шкал для кодирования геологического содержания слоя существенно затруднило соотнесение аббревиатуры типа пород с реальным качеством пород. Как оказалось, при составлении описаний исходных массивов данных использовались разные варианты обозначений (индексы), поскольку бурение скважин производилось в разное время. Обычно описания брались из наиболее известных таблиц. К примеру, в таблице 2 индекс gIII означает ледниковые верхнеплейстоценовые отложения, индекс sr-v – среднерусско-валдайский горизонт.

Сканирование геологической структуры Калининградской области продемонстрировало существенную изменчивость ее характеристик [11]. Например, для скважины №164-д характерными геологическими слоями разреза стали глина валунная, песок крупнозернистый, суглинки, переслаивание мергеля и алевролита, тогда как для скважины №27462 [14] – песок мелкозернистый с валунами, песок глинистый, глина.

Очевидно, что для использования возможностей компьютерных технологий в процессе проектирования источника водоснабжения для малого предприятия или частного дома (в том числе оценки геологических условий для них) за счет подземных вод необходимо построение цифровых образов каждой из реальных скважин, которые могут стать исходными данными для различных моделей [5; 15; 16]. Компьютерная организация реальных геологических данных предполагает однозначность восприятия геологических описаний программным пакетом или моделью.

### Проблемы оцифровки данных

В процессе изучения имеющихся геологических характеристик реальных скважин возник ряд проблем. Описания экспериментальных данных не всегда соблюдают единый стандарт, даже на уровне списка возможных параметров скважины. Например, описание литологического состава не всегда однозначно определяется «строгим» числом (значением коэффициента фильтрации), по причине отсутствия такого описания в известных стандартах (ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация»). Данное обстоятельство порождено также различием в разные годы подхода к описанию набора параметров скважины.

Для последующих процедур расчета было выполнено преобразование исходного интервального описания всех слоев к их равномерному по вертикали послойному описанию с дискретизацией в 1 м. При этом геологические описания (третий столбец в табл. 2) будут отражены в значении коэффициента фильтрации текущей породы, определенного на основе литологического состава слоя.

Обработка и преобразование в нужный формат вышеизложенного материала проводилась с помощью Jupyter Notebook. Используя средства библиотеки Pandas и NumPy, мы подготовили два файла: (1) содержащий одномерную информацию по известной скважине (географические координаты, название населенного пункта и т.д.), и (2) хра-



нящий вышеперечисленные описания (табл. 2) в числовом формате (коэффициенты фильтрации переведены с помощью ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация»).

Перед подготовкой файлов посредством Jupyter Notebook данные, содержащие географические координаты расположения места отбора, были дополнены информацией из файла описаний геологических характеристик разреза скважины, а именно: абсолютная отметка (м), Н – максимальная глубина (м), уровень появления (м), уровень установления (м) и дебит (л/с). Перечисленные параметры не распространяются на глубину скважины, потому их объединение было целесообразным.

В ходе преобразования данных удалось с помощью Jupyter Notebook сформировать цифровые образы геологических описаний в файлы, которые затем использовались при конструировании «виртуальной скважины».

73

### Этапы расчетов

Очевидно, что в случае близости точки запроса пользователя к какой-либо уже имеющейся скважине ее и можно выбрать в качестве искомой «виртуальной скважины». Однако такого рода выбор вряд ли обеспечит решение задачи проектирования водоснабжения для всех потенциальных пользователей.

Для построения «виртуальной скважины» (ВС) предполагается использовать данные нескольких ближайших к точке запроса пользователя буровых скважин [11; 12], содержащих полный набор сведений по расположению скважины и геологической структуре пород региона. Формирование слоев «виртуальной скважины» предполагается выполнить последовательно сверху вниз с шагом в 1 м.

Алгоритм построения искомой «виртуальной скважины» (ВС), учитывая параметры рядом расположенных реальных скважин, выполняет их аппроксимацию на одинаковой глубине в рассчитываемый горизонт «виртуальной скважины».

Разработка алгоритма поиска дистанции между двумя точками с известными географическими координатами была реализована на языке программирования JavaScript. Известно, что расстоянием между такими точками является длина дуги, проведенной на сфере через эти две точки. Ввиду малых расстояний между выбранными точками сферичность Земли не учитывалась в расчетах. В результате выполнения алгоритма поиска дистанции были определены три скважины из всего тестового набора буровых скважин, которые являлись ближайшими к ВС. Соответственно, на данном этапе разрабатывался алгоритм, который позволит получить все необходимые параметры для того, чтобы рассчитать глубину появления водоносного горизонта для водоснабжения малых предприятий и т. п., а также спрогнозировать геологические условия [8; 17; 18] в точке запроса пользователя.

На начальном этапе построения программного обеспечения был выбран вариант двумерной линейной интерполяции известных значений параметров буровых скважин. В итоге был реализован алгоритм, кото-

рый позволил на основании известных данных трех ближайших буровых скважин (долгота, широта, параметры) и местоположения «виртуальной скважины» построить уравнение плоскости, обеспечивающее получение значения для текущего рассчитываемого параметра ВС.

Разработанный алгоритм в помощь процессу проектирования водоснабжения малых предприятий и персональных пользователей за счет подземных вод позволил получить простое приближение геологических параметров, прогнозирующих реальное распределение слоев скважин в природе (рис. 2), и определить необходимые условия для водоснабжения участка.

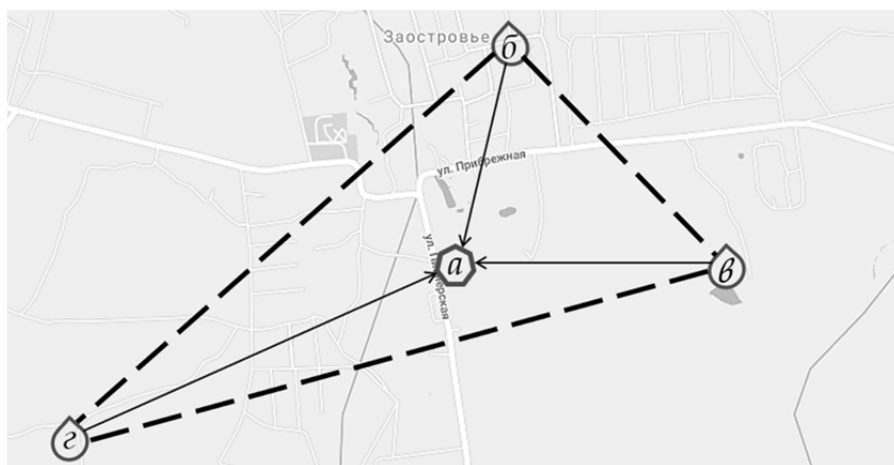


Рис. 2. Общая схема опытной реконструкции геологического строения для окрестности точки запроса пользователя ( $a$ ) в Зеленоградском районе Калининградской области (пос. Заостровье), которая показывает расположение трех буровых скважин ( $b - c$ ) относительно ( $a$ ) «виртуальной скважины», формирующих в пространстве зону аппроксимации геологических параметров (область, очерченная пунктирной линией) для «виртуальной скважины».

Картосхема была построена на основе спутникового снимка GoogleMaps [19]

В таблице 3 приведена сводная информация, полученная в результате исполнения разработанного алгоритма, прогнозирующего вертикальное геологическое строение пород для точки запроса пользователя (широта  $\sim 20.259$ , долгота  $\sim 54.948$ ) в Зеленоградском районе Калининградской области на основе существующих описаний послойных интервалов вертикальной геологической структуры пород рядом расположенных буровых скважин с известными идентификационными номерами. Расчет показал, что уровень появления воды располагается на 29,31 м, уровень установления — на 13,95 м, также стало известно приближенное значение дебита равное 0,62 л/с, который можно потребить из прогнозируемой для пользователя скважины. Из таблицы 3 видно, что следующие геологические слои расположены над уровнем появления воды: песок мелкозернистый, глина, гравийно-галечные отложения, глина, суглинки. Результат расчета позволил подразделить описания послойных интервалов вертикальной геологической структуры



пород в точке пользователя на 6 независимых слоев, каждый из которых подписан в таблице 3. Самым протяженным по глубине слоем оказался пятый слой мощностью 14 м, обозначающий тип пород – песок мелкозернистый, в котором по подсчетам и был обнаружен московско-валдайский межморенный водоносный горизонт.

Таблица 3

**Сводная таблица результатов подготовленного расчетного алгоритма  
для прогнозирования геологической структуры пород  
в окрестности точки пользователя**

Географические координаты, долгота / широта		Уровень появления, м
54.948 / 20.259		29,311
Начальное или конечное значение глубины слоя, м / значение коэффициента фильтрации, м/сут.		Описание литологического состава
1 / 0.05	1-й слой	Суглинки
6 / 0.05		Суглинки
7 / 0.001	2-й слой	Глина
14 / 0.001		Глина
15 / 35.0	3-й слой	Гравийно-галечные отложения
16 / 35.0		Гравийно-галечные отложения
17 / 0.001	4-й слой	Глина
22 / 0.001		Глина
23 / 20.0	5-й слой	Песок мелкозернистый
37 / 20.0		Песок мелкозернистый
38 / 0.001	6-й слой	Глина
50 / 0.001		Глина

75

### Обсуждение полученных результатов

Очевидно, что в случае слабой горизонтальной изменчивости геологической структуры в окрестности точки пользователя предложенный алгоритм вполне успешно справится с поставленной задачей построения «виртуальной скважины». Поэтому для проведения тестового расчета был выбран вариант «плохой» геологической ситуации, когда точка потенциального пользователя находится на стыке зоны гидрологического окна с высокой проницаемостью пород и традиционным для области строением пород [11].

В частности, для проверки работоспособности предложенного подхода в точке пользователя (широта ~20,259, долгота ~54,948) алгоритмом были выбраны три буровые скважины с идентификационными номерами 33010, 1788 и 22. Ближайшей точкой к ВС оказалась скважина №33010, расстояние до которой составило около 590 м.

Послойно опишем теперь реализацию алгоритма расчета скважины. Итак, верхним геологическим слоем выбранных скважин оказались суглинки, а именно от 1 до 4 м в глубину все значения коэффициентов





фильтрации равны 0,05 м/сутки. Расчет коэффициента для ВС путем интерполирования известных значений тоже показал суглинки. Однако, как видно из таблицы 3 с итогами расчета параметров ВС, ее первый слой составляет 6 метров.

Анализ процесса выполнения расчетного алгоритма показал, что на глубине 5 м скважина №22 имеет значение коэффициента фильтрации 68,0 м/сутки, а вычисленный коэффициент на текущем шаге интерполяции равен 20,896 м/сутки. Рассчитанное значение на данном шаге существенно отличается от двух других скважин, которые сохраняют идентичный между собой геологический слой, характеризуемый значением 0,05 м/сутки. Предложенный алгоритм интерполяции в таком случае автоматически присваивает для текущего горизонта ВС значение коэффициента фильтрации для соответствующего слоя ближайшей скважины. В данном случае это скважина №33010. Та же логика действует и для глубины 6 м.

В диапазоне от 7 до 50 м все коэффициенты на соответствующих горизонтах, участвующие в расчете, значительно отличались друг от друга, что говорит о существенной горизонтальной неоднородности геологической обстановки. Данное обстоятельство обуславливало вариант выбора параметров ближайшей скважины (№33010) для вычисления коэффициентов для ВС.

Таким образом, проверка предложенного алгоритма для сложных с геологической точки зрения условий продемонстрировала успешную работу и позволила определить геологические характеристики слоев для проектируемой скважины в точке запроса пользователя.

### Выводы

Предложен простой подход к получению предполагаемого вертикального геологического строения пород в окрестности проектируемой скважины для доступа к ресурсам подземных вод конкретного водоносного горизонта. Алгоритм расчета основан на послойном конструировании искомой «виртуальной скважины» и линейной аппроксимации данных по проницаемости пород для рядом расположенных скважин, ранее выполненных при геологическом сканировании региона. Для программной реализации алгоритма спроектирована схема компьютерной организации исходных массивов описаний скважин, хранящихся в рукописном виде на бумажных носителях.

Выполнен тестовый пример определения геологического строения пород для точки пользователя в Зеленоградском районе Калининградской области (пос. Заостровье), результаты которого позволили определить глубину залегания водоносного горизонта, а также получить описание типов пород по глубине и количество слоев «виртуальной скважины» на фиксированной глубине.

Открытая структура программного пакета с реализацией алгоритма позволяет в дальнейшем перейти к другим, более сложным, вариантам аппроксимации данных, а также произвести расчет зоны санитарной



охраны для окрестности точки запроса пользователя и оформить все необходимые рекомендации для выбранного участка предприятия или частного дома.

*Работа выполнена при поддержке регионального гранта РФФИ и Правительства Калининградской области №19-45-390007.*

### Список литературы

1. Белоусова А.П. Региональная оценка устойчивости ресурсов подземных вод России при антропогенном воздействии за 2005–2010 годы // Недропользование XXI век. 2013. №6. С. 84–89.
2. Музалевский А.А., Карлин Л.Н. Экологические риски: теория и практика. СПб., 2011.
3. Вартамян Г.С. Экогеология России. М., 2000. Т. 1 : Европейская часть.
4. Воистинова Е.С., Парфенова Г.К. Устойчивое развитие территорий и геоэкологические проблемы водопользования (на примере Кемеровской области) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2010. №4. С. 312–318.
5. Ошкадер А.В., Подлипенская Л.Е. Математические модели количественной оценки экологического риска при использовании подземных вод // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2017. №6. С. 66–82.
6. Куролап С.А., Яковенко Н.В., Комов И.В. Диагностика территориальных ситуаций (на основе информационно-аналитической системы) // Проблемы региональной экологии. 2016. №5. С. 99–103.
7. Осипов В.И. Адаптационный принцип природопользования (доклад на Девятнадцатых «Сергеевских чтениях», 4–5 апрель 2017 г.) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2017. №5. С. 3–12.
8. Орадовская А.Е., Лапшин Н.Н. Санитарная охрана водозаборов подземных вод. М., 1987.
9. Семенчук А.В. Условия формирования подземных вод Балтийской косы (Калининградская область) : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2018.
10. Кудельский А.В., Норова Л.П. О прикладной гидрогеохимии // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2014. №1. С. 91–96.
11. Михневич Г.С. Пространственная дифференциация территории Калининградской области по степени защищенности подземных вод от загрязнения // География: проблемы науки и образования / отв. ред. В.П. Соломин, Д.А. Субетто, Н.В. Ловелиус. СПб., 2011. С. 129–132.
12. Курпянова А.Е., Михневич Г.С., Гриценко В.А. Виртуальная скважина как элемент проектирования водоснабжения пользователей за счет подземных вод // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ», г. Санкт-Петербург, 22–24 октября 2020 г. С. 621–622. URL: [http://hydromet2020.rshu.ru/wp-content/uploads/2020/12/Сборник-тезисов\\_Конференция\\_Современные-проблемы-гидрометеорологии-и-мониторинга-окружающей-среды-на-пространстве-СНГ\\_РГГМУ-2020.pdf](http://hydromet2020.rshu.ru/wp-content/uploads/2020/12/Сборник-тезисов_Конференция_Современные-проблемы-гидрометеорологии-и-мониторинга-окружающей-среды-на-пространстве-СНГ_РГГМУ-2020.pdf) (дата обращения: 19.11.2020).
13. Рабочий проект водоснабжения пос. Вербное колхоза «Победа» Зеленоградского района Калининградской области. Калининград, 1983.
14. Технорабочий проект дома-интерната для престарелых и инвалидов в пос. Заостровье Зеленоградского района Калининградской области. Калининград, 1981.



15. ГИС помогает улучшить использование подземных вод в Кувейте // По материалам Esri. ArcReview. URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2015/08/03/гис-помогает-улучшить-использование/> (дата обращения: 19.11.2020).

16. Куприяновский В.П., Тищенко П.А. и др. Разумная вода: интегрированное управление водными ресурсами на базе смарт-технологий от Esri и IBM // По материалам Esri. ArcReview. URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2014/03/15/разумная-вода-интегрированное/> (дата обращения: 19.11.2020).

17. Радионов Г.П., Кутецкая Т.А. и др. Проектирование водоохраных зон с применением ПО ESRI // По материалам ESRI. ArcReview. URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2006/03/15/water-body-buffer-zone/> (дата обращения: 19.11.2020).

18. Ошкадер А.В. Методологические основы оценки экологической ситуации при использовании подземных вод // Проблемы региональной экологии. 2015. №6. С. 97 – 102.

19. Google Карты. URL: <https://www.google.com/maps/@54.7127296,20.5184453,4466m/data=!3m1!1e3!5m1!1e1?hl=ru-RU> (даты обращения: 25.01.2021, 29.01.2021).

#### Об авторе

Анастасия Евгеньевна Куприянова – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: [united\\_jemelt8@mail.ru](mailto:united_jemelt8@mail.ru)

#### The author

Anastasia E. Kupriyanova, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: [united\\_jemelt8@mail.ru](mailto:united_jemelt8@mail.ru)