

УДК 910.1

DOI: 10.15372/GIPR20220318

И.П. БАРАНОВ, В.И. СТЕПАНОВАИнститут биологического приборостроения РАН,
142290, Пушкино, ул. Институтская, 7, Россия, georeolog@gmail.com, agroecology@inbox.ru**АНАЛИЗ ЛИТОДИНАМИКИ ЮГА КАМЧАТКИ
С ЦЕЛЮ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ ВЫХОДА ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД**

На фоне роста потребления энергии все больше внимания уделяется нетрадиционным энергоносителям, в том числе природным ресурсам термальных источников. Наряду с проблемами использования термальных вод, важной задачей является их поиск. Представлен опыт анализа карт пластики рельефа для обнаружения термальных источников, полученный на примере юга Камчатки. По картосхемам пластики рельефа были выявлены линейные и кольцеобразные зоны напряженности земной коры. Особый интерес представляют места пересечения линейных и кольцевых структур. Здесь возникают зоны повышенной трещиноватости пород, в пределах которых расположены действующие и потухшие вулканы и термальные источники. Представлена карта перспективных участков, освоение которых в ближайшем будущем позволит экологически безопасно решить проблемы энергопотребления, расширит географию туризма и курортной бальнеологии. Это даст толчок к развитию всего региона в целом. Опыт анализа карт пластики рельефа с целью обнаружения термальных источников в дальнейшем может быть применен на всей территории России, в том числе при поиске рудных месторождений.

Ключевые слова: обнаружение термальных источников, пластика рельефа, картография, зоны напряженности земной коры, кольцевые структуры, линейные структуры.

I.P. BARANOV, V.I. STEPANOVAInstitute of Biological Instrumentation, Russian Academy of Sciences,
142290, Pushchino, ul. Institutskaya, 7, Russia, georeolog@gmail.com, agroecology@inbox.ru**ANALYSIS OF LITHODYNAMICS OF THE SOUTH OF KAMCHATKA
IN ORDER TO IDENTIFY POTENTIAL SITES OF THERMAL WATER EMERGENCE**

With an increase in energy consumption, more and more attention is being paid to nontraditional energy, including natural resources of thermal springs. Along with the problems of using thermal waters, their search is an important task. The experience of analyzing maps of plastic relief for the detection of thermal springs, obtained by using the example of the south of Kamchatka, is presented. Linear and ring-shaped zones of tension of the Earth's crust were identified according to the maps of the relief plasticity. Of particular interest are the intersections of linear and ring structures. There arise zones of increased fracturing of rocks, within which active and extinct volcanoes and thermal springs are located. A map of promising sites is presented, the development of which in the near future will make it possible to solve the problems of energy consumption in an environmentally safe way, expand the geography of tourism and spa balneology. This will give an impetus to the development of the entire region as a whole. The experience of analyzing relief plastic maps in order to detect thermal springs can be applied throughout Russia in the future, including when searching for ore deposits.

Key words: detection of thermal springs, relief plastic, cartography, zones of tension in the Earth's crust, ring structures, linear structures.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные проявления термальных вод на земной поверхности с давних времен привлекали внимание человека. Ценность данных вод — в том, что они не только обладают бальнеологическими свойствами, но и являются источником мышьяка, сурьмы, иттербия, бария, никеля, молибдена, цинка, сурьмы, бора, стронция, ванадия — важных химических элементов, применяемых в промышленности. Геотермальные источники — огромный резервуар энергии, способный удовлетворить энергетические потребности Земли.

Последние 70 лет ведется активный поиск источников подземного тепла, рассматриваются различные варианты их экономически выгодного использования. К числу таких объектов относятся камчатские источники термальных вод. Еще в 1930-х гг., в ходе первых геологических экспедиций на Камчатку, была обнаружена связь термальных источников с вулканами и тектоническими структурами [1, 2]. Под воздействием высоких глубинных температур и давления потоки подземных вод устремляются к поверхности, используя системы трещин, разрывов и кратеров потухших вулканов. Часть термальных вод заполняет пустоты в проницаемых породах, а часть выходит на поверхность в виде источников, ключей, гейзеров, грифонов. Обычно они локализуются на дне древних кальдер и в пределах разломов различного возраста и глубины. В рельефе места выхода вод приурочены к долинам рек и ручьев. Разломы служат каналами поступления поверхностных вод и выводящими путями для глубинных вод [3]. Выявлена взаимосвязь термальных вод с холодными водами, поскольку первые являются неотделимой частью подземных вод артезианских бассейнов или складчатых областей и должны изучаться совместно с ними в объединяющей их водонапорной системе [4].

Наиболее перспективные области Камчатки, входящие в состав глобального Тихоокеанского вулканического пояса, — зоны молодых тектонических движений, на востоке, юге и в Центрально-Камчатской впадине [5–7]. Часть тектонических структур уже выявлена ранее в процессе исследования территории. Однако значительная часть все же остается скрыта толщами пород. Ввиду того, что вулканы (действующие и потухшие) и термальные источники приурочены к тектоническим объектам, поиск терм в первую очередь ориентирован на наличие центров излияния и зон повышенной трещиноватости горных пород. Для их обнаружения авторами был использован в качестве инструмента метод пластики рельефа, проведен анализ структур и систем литодинамического каркаса верхней части земной коры.

Задачи данной работы — сравнение местоположения уже известных термальных источников со структурами, выявленными по картам пластики рельефа; использование потенциала литодинамических карт для поиска районов наиболее вероятного местоположения термальных минеральных вод в виде скрытых подземных резервуаров и явных проявлений на дневной поверхности. В качестве примера выбрана территория юго-восточной части п-ова Камчатка. Данный район известен широким проявлением современного и древнего вулканизма, высокой концентрацией геотермальных источников.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Способов обнаружения подземных термальных вод немало. В их основе — измерение температуры наземного воздуха и почвенного покрова, определение соотношения изотопов гелия-3 в образцах, полученных методами бурения и из поверхностных источников [8], бурение скважин.

В качестве основного метода исследований взята концепция пластики рельефа, включающая в себя одноименную технологию составления литодинамических карт и анализ полученных потоков, структур и систем. Концепция разработана и математически формализована группой ученых Пушинского научного центра под руководством проф. И.Н. Степанова [9, 10]. В основе идеи лежит технология «пластика рельефа», объекты которой — горизонталы топографических, батиметрических и структурных карт. Литодинамические потоки проявляются везде, где есть градиент высот, независимо от местоположения — на суше или дне Мирового океана, в кровле геологических горизонтов.

Метод позволяет визуализировать и современные, и более древние структуры тектонического и литодинамического генезиса. При этом земная поверхность дифференцируется на отдельные динамические потоки. Однако они образуют взаимосвязанные структуры и системы, простирающиеся на тысячи километров, что делает картину мира цельной.

С 2014 г. авторами используется методика пластики рельефа для поиска резервуаров пресных подземных вод на территории Крыма и прилегающих акваторий [11–13]. Был выявлен ряд локальных резервуаров артезианских вод, сформировавшихся в районах тектонических прогибов. Древние реки проложили на их месте свои русла, здесь же шло накопление аллювиальных отложений, которые стали хранилищем пресных вод. По форме литодинамических структур и систем палеорек были обнаружены потенциальные области концентрации подземных пресных вод.

В процессе многолетнего изучения литодинамических структур и систем концепция также была успешно апробирована на месторождениях нефти, газа, золота и др., где важным критерием выступало обнаружение тектонических дислокаций, зон повышенной трещиноватости горных пород. В плане такие зоны имеют вид линейной или кольцеобразной формы.

На кольцевые структуры и близкие к ним по форме образования геологи и ранее обращали внимание. Их дешифровали по аэрофото- и космоснимкам. При этом чтение снимков осложняется такими факторами, как прозрачность атмосферы, погодные условия и наличие наземных объектов (в частности, растительного покрова высотой более метра). Эффективен и способ визуализации по орографическим и гидрографическим схемам, близкий по своей сути методу пластики рельефа: в обоих подходах в основе лежит математическая модель рельефа. Только в первом случае расчет проводится по точкам максимальной положительной и максимальной отрицательной кривизны. Метод пластики рельефа учитывает и те, и другие величины, вводя еще и точку нулевой кривизны, что позволяет рассматривать рельеф и геологические образования как объемные тела, имеющие вектор пространства. Пластика рельефа также учитывает каждый изгиб горизонталей, элементов гидросети, береговой линии. Метод эффективен и там, где горизонталы сильно разрежены, на равнинном рельефе, где современные осадочные толщи перекрывают более древние тектонические образования. В горной и возвышенной областях визуализация кольцеобразных и линейных структур становится более очевидной.

На картах пластики рельефа кольцеобразные структуры выявляются по изгибам потоков-повышений и ложбин понижений, близким к форме кольца (рис. 1). Иногда структуры расположены в пределах одной литодинамической единицы, иногда охватывают несколько потоковых систем. Наибольший интерес представляют области пересечения кольцеобразных структур как места повышенной и устойчивой напряженности земной коры. Для них характерна высокая трещиноватость горных пород, что значительно повышает их коллекторские свойства. По этим же зонам происходит вертикальная миграция подземных вод из нижних горизонтов в верхние.

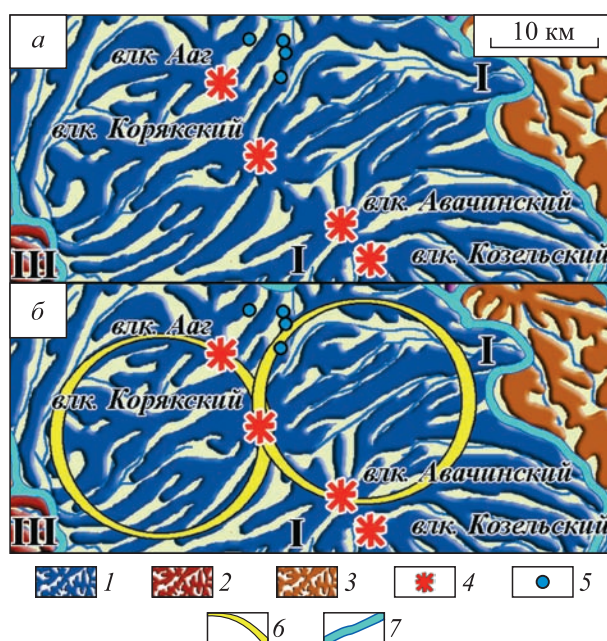
Линейные области напряженности земной коры — это протяженные явные или скрытые под земной поверхностью вероятные тектонические образования. Авторы умышленно не ставят знак равенства между ними и разломами, ввиду использования только камерального метода их выявления. Тем не менее почти двадцатилетний опыт их обнаружения, значительная степень корреляции с выявленными в полевых условиях разломами в различных областях Земли говорят о высокой информативности горизонталей карт. В основу их визуализации положены следующие признаки:

- прямолинейность и протяженность литодинамических потоков-повышений и впадин между ними. Особенно это характерно для зон контакта соседних литодинамических систем и структур;
- области аномального изменения направленности литодинамических потоков;
- участки прерывания потоков-повышений (в том числе оползневые структуры);
- линейные протяженные крутые склоны (уступы);
- комбинации совмещения нескольких признаков друг с другом. Например, протяженный прямолинейный поток-повышение через незначительный интервал будет иметь продолжение в виде потока соседней потоковой структуры, или на одной прямой будут расположены протяженные повышения и понижения.

Как и в случае с кольцеобразными структурами, заслуживают внимания места пересечения линейных структур (узлы), а также области пересечения линейных структур с кольцеобразными, особенно в местах контакта нескольких кольцеобразных структур.

Рис. 1. Пример выявления кольцеобразных структур по рисунку литодинамических потоков пластики рельефа.

а — исходная карта литодинамики; б — выявление кольцеобразных структур по изгибам потоков литодинамических структур. Литодинамические системы: 1 — Авачинско-Корякская (I), 2 — Восточного хребта (II), 3 — остальные. 4 — вулканы; 5 — термальные источники; 6 — кольцеобразные структуры; 7 — границы распространения литодинамических систем.



РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения анализа территории в качестве исходной карты использовалась топографическая карта м-ба 1:500 000, которая стала базовой для дальнейших исследований. Визуализированные на карте пространственные (плановые) литодинамические потоки сложены вулканическими и метаморфическими породами и образуют структуры и системы древовидной формы. Под влиянием эрозионных, транспортных и аккумуляционных процессов выветривания менее плотные породы размываются и выносятся далеко за пределы материнской структуры по понижениям. В это же время более плотные породы повышенной еще длительное время сохраняют общую форму, хотя и испытывают деструктивное влияние внешних сил.

По внешним признакам потоки равнинных и горных территорий различаются. Так, в пределах хребтов, одиночных сопок или вулканов потоки значительно уже, путь их извилист и обрывист, в отличие от выровненных, более широких и протяженных потоков равнин.

Помимо внешних сил, на генезис, развитие и форму литодинамических образований влияют и внутренние силы — динамика тектонических плит, одним из проявлений которой является вулканизм. По своему тектоническому расположению вулканы разделены на группы, к которым приурочены геотермальные источники. Рассмотрим группы, относящиеся к области исследования данной статьи.

Авачинско-Корякская группа представлена вулканами Ааг, Арик, Корякская сопка, Авачинская сопка, Козельский, которые расположены цепью в северо-западном направлении, вдоль северного борта Авачинского грабена. Эти образования являются частью глубинного разлома, секущего грабен вдоль его северного борта.

Жупановско-Дзедзурская группа включает в себя вулканы Жупановский и Дзедзур. Группа вулканов образует горный хребет, простирающийся в северо-западном направлении, продолжающий поднятие Шипунского полуострова. Составляющие его вулканы приурочены к тектоническим разломам, секущим миоценовые и плиоценовые вулканогенные породы.

Восточный хребет представлен группой сильно разрушенных вулканов Шиш, Тумрок, Иульт, Конради, Заварицкого, Бакенинг, Вачкажец. Пик извержений их приходится на ранний плейстоцен, когда возникли обширные покровы базальтовых лав.

Следующие две группы относятся к Южно-Камчатской грабен-синклинали.

К *депрессии Толмачёв* Дол относятся вулканы Вилочинский, Опала, Горелый, Большая Ипелька, Толмачёва, Карымшина, Тундровый, Мутновская сопка, Асача, Жёлтый. Депрессия расположена между верховьями рек Карымчина и Опала. В ее центре расположена кальдера — озеро Толмачёва. В непосредственной близости — крупные кальдеры вулканов.

Вулканотектоническая Голыгинская депрессия включает в себя вулканы Ходутка, Пиратковский, Ксудач, кальдеру Призрак. Вулканы расположены в бассейне р. Голыгина.

В результате анализа местоположения и ориентировки литодинамических потоков были выявлены потоковые системы, каждая из которых отличается положением, ориентировкой, центром дивергенции (рис. 2). Также на картосхему были нанесены вулканы и термальные источники.

Как видно из картосхемы (см. рис. 2), положение систем и их границы коррелируют с вулканическими группами. Это обусловлено тектоническими процессами и структурами, проявленным вулканизмом. Таким образом, вулканические процессы и тектоника находят отражение в рисунке литодинамических систем, каждая из которых соответствует крупным тектоническим блокам.

Далее по рисунку пластики рельефа были выявлены линейные и кольцеобразные тектонические структуры. Узловые места пересечения двух и более линейных структур обозначались точками. Особый интерес представляют места пересечения узлов линейных тектонических структур с кольцеобразными. Это наиболее перспективные области проявления разгрузки и скопления термальных минеральных вод.

Анализ вулканических групп представлен на примере Авачинско-Корякской и Жупановско-Дзедзурской вулканических групп (рис. 3). В первоначальном варианте авторами были выявлены и другие кольцеобразные и линейные образования, но их количество сильно затрудняет чтение картосхемы. Поэтому были оставлены только очевидные структуры, информативность которых отражает общую тектоническую ситуацию региона.

Места пересечения нескольких линейных структур, кольцеобразных форм, линейных и кольцеобразных структур были отмечены как наиболее перспективные области. При сопоставлении положения уже известных, открытых ранее групп источников и прогноза по картосхеме пластики рельефа установлено их полное соответствие расположению относительно перспективных областей (рис. 4).

Рис. 2. Картограмма пластики рельефа юго-восточной части Камчатки.

Литодинамические системы: 1 — Авачинско-Корякская (I), 2 — Жупановско-Дзендзурская (II), 3 — Восточного хребта (III), 4 — депрессии Толмачёв Дол (IV), 5 — Голыгинской депрессии (V), 6 — остальные. 7 — вулканы; 8 — термальные источники; 9 — суша; 10 — море; 11 — береговая линия; 12 — границы распространения литодинамических систем.

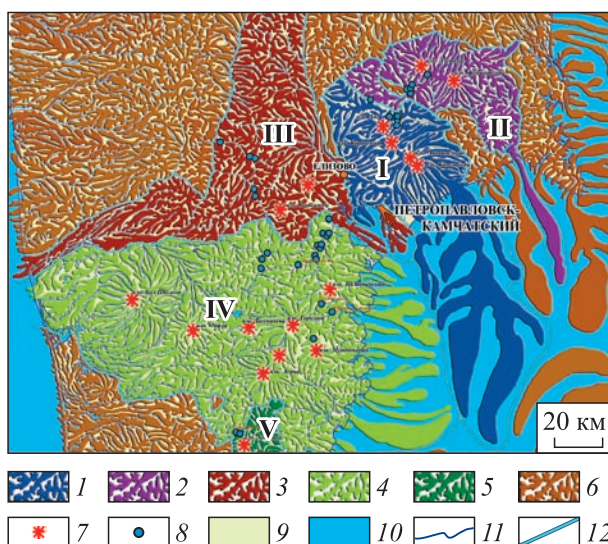


Рис. 3. Линейные и кольцеобразные структуры Авачинско-Корякской и Жупановско-Дзендзурской вулканических групп.

Литодинамические системы: 1 — Авачинско-Корякская (I), 2 — Жупановско-Дзендзурская (II), 3 — Восточного хребта (III), 4 — депрессии Толмачёв Дол (IV), 5 — остальные. 6 — вулканы; 7 — термальные источники; 8 — линейные структуры и узлы их пересечения; 9 — кольцеобразные структуры; 10 — море; 11 — суша; 12 — границы распространения литодинамических систем.



Рис. 4. Потенциальные области проявления геотермальных подземных вод.

Литодинамические системы: 1 — Авачинско-Корякская (I), 2 — Жупановско-Дзендзурская (II), 3 — Восточного хребта (III), 4 — депрессии Толмачёв Дол (IV), 5 — остальные. 6 — вулканы; 7 — термальные источники; 8 — линейные структуры и узлы их пересечения; 9 — кольцеобразные структуры; 10 — перспективные области; 11 — море; 12 — суша. 13 — границы распространения литодинамических систем.

Это позволило выявить ряд новых перспективных объектов, расположенных на разломах и непосредственно связанных с вулканами.

Конечно, масштаб карты (1:500 000) не позволяет установить конкретную точку поиска, для этого необходим анализ более детальных топографических карт. Тем не менее данный материал можно использовать как для сравнения с имеющимися данными, так и в качестве отправной точки для проведения поисково-разведочных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общеизвестен принцип размещения термальных источников вблизи вулканов, в пределах тектонических разломов, которые обладают высоким уровнем фильтрации, транспортировки, аккумуляции и разгрузки подземных термальных вод посредством зон высокой трещиноватости пород. Однако не везде данные процессы проявляют себя на дневной поверхности. Сейчас юго-восточная часть Камчатки считается относительно спокойным регионом, следы прежней активной вулканической и тектонической деятельности в виде кольцеобразных и линейных структур сохранились в формах земной поверхности. Часть из них скрыта толщами вулканических пород.

Для обнаружения перспективных зон концентрации термальных вод авторами был выбран метод пластики рельефа, который позволяет выявлять подповерхностные тектонические образования, в пределах которых формируются магматические очаги, места существующих и потенциальных прорывов земной коры, области аккумуляции и разгрузки минеральных термальных вод. В процессе анализа положительных и отрицательных форм земной поверхности были обнаружены перспективные линейные и кольцеобразные зоны напряженности земной коры, места их пересечения — области наиболее вероятного проявления геотермальных источников. Отмечена высокая степень корреляции местоположения выявленных по пластике рельефа зон повышенной напряженности земной коры, вулканов и открытых термальных источников. На основании этих фактов была предложена картосхема потенциальных районов проявления геотермальных источников, их подповерхностной локализации.

Хотя в любом из научных способов заложен элемент субъективизма, погрешности оператора или программы, каждый метод является важным шагом в положительном развитии науки для решения актуальных задач. В основе потоков пластики лежат математически измеренные значения абсолютных высот рельефа и проведенные по ним изолинии, поэтому данный способ выявления кольцеобразных структур может стать полезным источником информации при проведении поисковых работ по обнаружению гидротермальных источников, перспективных тектонических образований как источников минеральных ресурсов.

Известно, что использование геотермальных вод в хозяйственных целях полуострова пока весьма ограничено как по направленности (геотермальная тепловая энергия и бальнеология), так и по площади. Труднодоступность, низкая плотность населения (0,67 чел/км²), сейсмические и вулканические процессы делают проект нерентабельным. В то же время создание сети станций, вырабатывающих дешевую электроэнергию, позволит снабжать население Петропавловска-Камчатского и населенных пунктов полуострова. Это может стать важным подспорьем в развитии всего Дальнего Востока.

Услугами бальнеологического характера пользуются в основном местные жители и незначительное число туристов (230–240 тыс. чел. в год). Тем не менее в России есть и другие области, где открыты доступные запасы геотермальных вод (Дагестан, Северный Кавказ, районы Западной Сибири, зона Байкала). Эти места более доступны, с высокой плотностью населения (с высоким спросом). Таким образом, опыт анализа карт пластики рельефа, полученный на примере Камчатки и представленный в данной статье, может значительно упростить понимание тектоники региона, позволит выявить прогнозные области добычи полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пийп Б.И. Термальные ключи Камчатки. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1937. — 268 с.
2. Мурадов С.В. История изучения термальных вод Камчатского края // Материалы XXVI Крашенинниковских чтений. — Петропавловск-Камчатский, 2009. — С. 146–152.
3. Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм / Отв. ред. В.М. Сугробов. — М.: Наука, 1986. — 207 с.
4. Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. — Владивосток: Дальнаука, 2003. — 216 с.

5. **Апродов В.А.** Вулканы. — М.: Мысль, 1982. — 367 с.
6. **Арсанова Г.И.** Редкие щелочи в термальных водах вулканических областей. — Новосибирск: Наука, 1974. — 110 с.
7. **Маврицкий Б.Ф.** Термальные воды складчатых и платформенных областей СССР. — М.: Наука, 1971. — 244 с.
8. **Mack Kennedy B., Soest M.C. van.** Flow of Mantle Fluids Through the Ductile Lower Crust: Helium Isotope Trends // Science. — 2007. — Vol. 318, issue 5855. — P. 1433–1436.
9. **Степанов И.Н., Анисимов И.Г., Бордунов А.А., Деева Н.Ф., Камалов Л.Ф., Лопачев Н.А., Муратова В.С., Пейдо Л.П., Поветухина З.Ф., Степанов Г.Н., Ушакова Т.П., Хакимов Ф.И., Чембарисов Э.И.** Методика составления серии среднемасштабных тематических карт «Природно-мелиоративная и сельскохозяйственная оценка Срединного региона СССР» // Материалы Всесоюз. конф. «Оценка природно-мелиоративных условий и прогноз их изменений». — Пушино, 1977. — С. 23–93.
10. **Степанов И.Н.** Теория пластики рельефа и новые тематические карты. — М.: Наука, 2006. — 230 с.
11. **Баранов И.П., Степанова В.И.** Палеорекострукция древних дельт Азовского и северо-восточной части Черного моря как потенциальных резервуаров подземных артезианских вод на основе метода пластики рельефа // Сб. материалов XII Междунар. науч.-практ. конф. «Современные концепции научных исследований». — М., 2015. — С. 27–30.
12. **Баранов И.П., Степанова В.И.** Возможности решения проблемы водоснабжения Крыма за счет подземных вод на дне Азовского и Черного морей // Вода Magazine. — 2016. — № 3 (103). — С. 32–37.
13. **Баранов И.П., Степанова В.И.** Выявление локальных резервуаров подземных вод Равнинного Крыма на основе карты литодинамических потоков // Уч. зап. Крым. федер. ун-та. География. Геология. — 2020. — Т. 6 (72), № 3. — С. 266–279.

Поступила в редакцию 05.06.2021

После доработки 27.10.2021

Принята к публикации 29.03.2022