

О ХИМИЗМЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЯКУТСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА

В. М. Максимов

В настоящей работе на основе гидрогеологических исследований, выполненных в 1951—1955 гг. на территории Якутского бассейна, дается краткая характеристика химического состава подземных вод с точки зрения их пригодности для водоснабжения населенных пунктов, расположенных на территории бассейна.

В работе использованы материалы гидрогеологических исследований, проведенных автором в 1951—1953 гг., и некоторые анализы по химизму вод Якутского артезианского бассейна, собранные в 1954—1955 гг. гидрогеологом Е. А. Басковым.

1. Общая характеристика бассейна

Якутский артезианский бассейн — один из крупнейших бассейнов Советского Союза по занимаемой площади и мощности слагающих его осадочных толщ, различных по составу, возрасту и происхождению. Мощность осадочных отложений измеряется километрами (от 1—2 км в южной части бассейна до 3 км и более в центральной части).

Граница бассейна на юго-западе, западе, северо-западе условно проводится в пределах Ангара-Ленской складчатой полосы по линии: Верховье р. Чоны — пос. Сюльджюкяр на р. Вилюе, затем по Мунскому и Оленекскому поднятиям. На юге бассейн граничит с Патомо-Витимской складчатой областью и Алданским массивом; на юго-востоке, востоке граница бассейна проходит в пределах полосы складчатого кембрия рек Май, Юдомы; Аллах-Юня. На севере, северо-востоке бассейн ограничивается Верхоянской складчатой областью. Таким образом, Якутский артезианский бассейн имеет довольно прихотливые очертания и занимает центральное положение среди других гидрогеологических районов северо-востока Советского Союза: Тунгусского, Оленекского бассейнов и Анабарского гидрогеологического массива — на западе, Хатангского бассейна — на севере, Западно-Верхоянской и Восточно-Верхоянской складчатых гидрогеологических областей — на северо-востоке и востоке, Верхнеленского бассейна и Алданского гидрогеологического массива — на юге (рис. 1).

В указанных границах площадь бассейна составляет примерно 1 101 000 км².

В строении бассейна принимают участие палеозойские, мезозойские и кайнозойские отложения, причем по периферии бассейна на

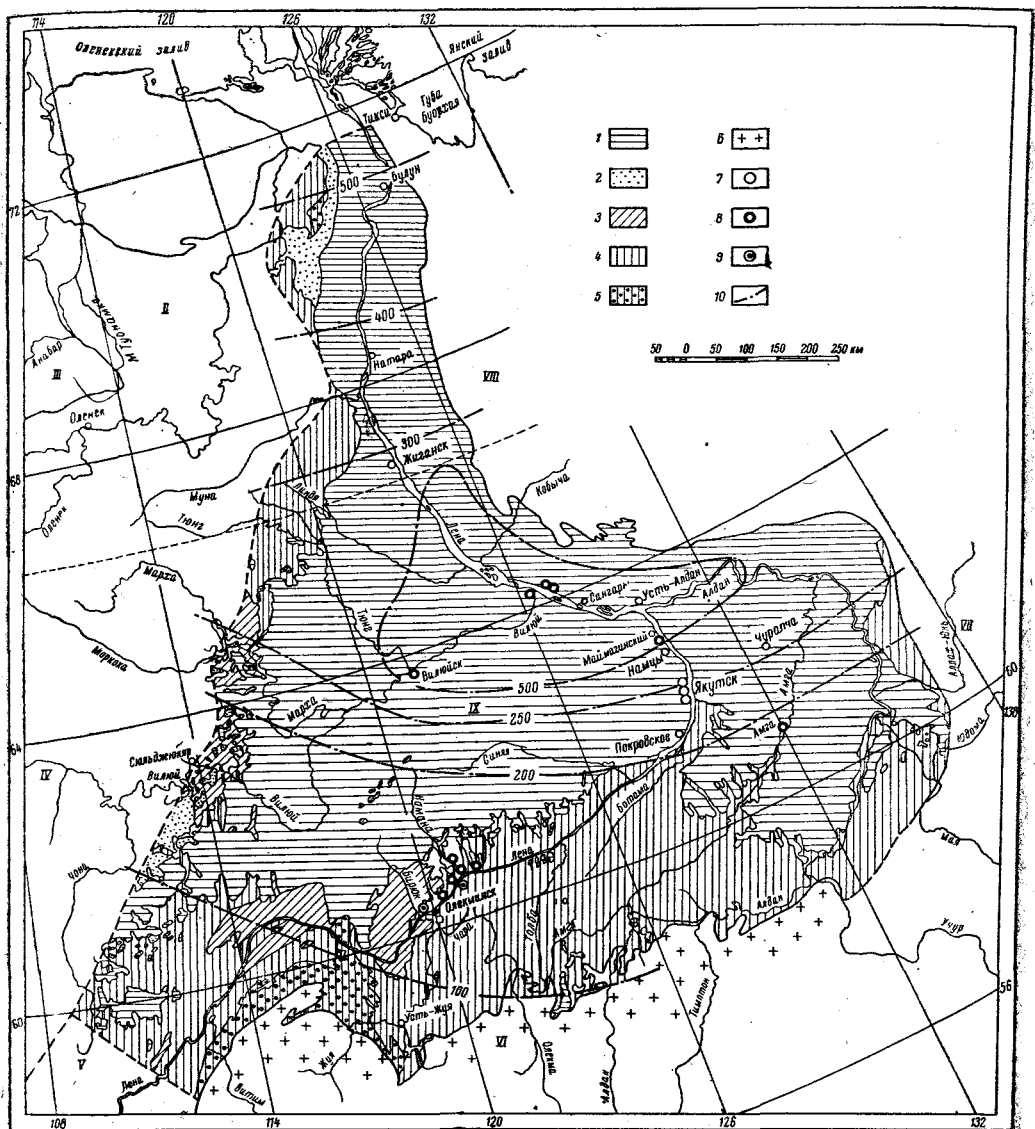


Рис. 1. Схематическая гидрогеологическая карта Якутского артезианского бассейна (составлена В. М. Максимовым). Подземные воды:

1 — мезокайнозойских отложений; 2 — нижнекаменноугольных, пермских и триасовых отложений и порфироидной формации верхнепалеозойского и нижнемезозойского возраста (не изученные); 3 — ордовикских и силурийских отложений; 4 — кембрийских отложений; 5 — верхнепротерозойских или нижнекембрийских отложений; 6 — допалеозойских образований. Скважины: 7 — эксплуатационные и разведочные на воду; 8 — нефтеразведочные; 9 — солеразведочные; 10 — изолинии мощности зоны многолетнемерзлых горных пород (по Н. И. Толстихину с дополнениями по новым данным)

Гидрогеологические районы: I — Хатангский артезианский бассейн; II — Оленекский артезианский бассейн; III — Анабарский гидрогеологический массив; IV — Тунгусский артезианский бассейн; V — Верхнеленский артезианский бассейн; VI — Алданский гидрогеологический массив; VII — Восточно-Верхоянская гидрогеологическая область; VIII — Западно-Верхоянская гидрогеологическая область; IX — Якутский артезианский бассейн

кристаллическом основании распространены преимущественно палеозойские карбонатные породы с широким развитием среди них гелогенных образований. Внутренняя часть бассейна сложена мощным комплексом мезокайнозойских, главным образом песчано-глинистых, образований, среди которых широко распространены пресноводные терригенные осадки. Кристаллические породы докембрия составляют Алданский массив и вскрыты нефтеразведочными скважинами в Олекминском, Якутском, Алданском и других районах, а также на реках Толбе и Амге.

Кристаллические породы в бассейне залегают на различных глубинах: в южных районах — на глубине около 500—1600 м, причем породы докембрия здесь покрываются отложениями палеозоя; в окрестностях Якутска кристаллические породы вскрыты под отложениями мезокайнозоя на глубине около 600 м, а в районе Виллюйска они залегают на глубине более 3000 м, так как глубокая скважина в Виллюйске прошла в мезокайнозойских образованиях 2935 м, не вскрыв палеозойских пород. Следовательно, рельеф фундамента в пределах Якутского артезианского бассейна не столь спокоен, как считалось до последних лет. Он представляет собой чередование поднятий и понижений поверхности древнего рельефа фундамента, сложенного кристаллическими породами.

Палеозойские отложения широким поясом окаймляют внутреннюю часть бассейна с северо-запада, запада, юга и юго-востока. Эти отложения расчленяются на ряд ярусов и свит, в разрезе которых приобладают карбонатные породы — доломиты, известняки (рис. 2). На северо-западе бассейна палеозойские отложения полого падают на восток — в долину р. Лены; на юге палеозой характеризуется общим падением пород на север, северо-запад (в сторону Виллюйской впадины). Внутренняя часть бассейна, как отмечалось выше, сложена мезокайнозойскими отложениями, мощность которых изменяется от 600—700 (окрестности Якутска) до более 3000 м (район Виллюйска).

Характерной особенностью Якутского артезианского бассейна является развитие в его пределах зоны многолетнемерзлых горных пород, о мощности которой дают представление изолинии зоны мерзлоты, проведенные по данным скважин, пройденных на территории бассейна в последние 5 лет с учетом карты, ранее составленной Н. И. Толстихиным для всей области развития многолетнемерзлых горных пород в СССР (см. рис. 1). Мощность зоны многолетнемерзлых горных пород в общем возрастает в северном направлении, чем и объясняется сокращение числа водоносных горизонтов и областей питания последних в том же направлении. Однако на фоне общего возрастания зоны многолетнемерзлых горных пород в северном направлении в пределах Якутского бассейна выделяются участки, где нижняя поверхность зоны мерзлых горных пород значительно опускается на глубину (Предверхо-Янская депрессия, район Виллюйска), что скорее связано с глубоким залеганием кристаллических пород фундамента на этих участках и развитием мощного комплекса мезокайнозойских песчано-глинистых пород, тепловые свойства которых отличаются от подобных свойств палеозойских пород.

Изменение мощности зоны многолетнемерзлых горных пород в северном направлении имеет большое значение для понимания гидрогеологии бассейна в целом и режима его водоносных горизонтов в отдельности, так как в том же направлении изменяется температура многолетнемерзлых горных пород (от -1 — $-1,5^{\circ}$ в южных районах бассейна до -6 — -8° в северных), среднегодовая температура воздуха (от -5 — -6° в южных районах до -10 — -12° в северных) и геолого-структурное строение бассейна (от преимущественно карбонатного нижнего палеозоя

с общим пологим падением пород на север-северо-запад в южных районах до песчано-глинистого мезокайнозоя с глубокими понижениями поверхности фундамента в центральных районах, нижнего палеозоя и мезокайнозоя с пологим падением пород в долину р. Лены в северных районах).

Гидрогеология Якутского бассейна в настоящее время изучена неодинаково по площади и глубине. Наиболее исследована центральная и южная части бассейна, значительно менее — северная. При этом водоносность палеозойских и мезокайнозойских отложений установлена гидрогеологическими съемками различных масштабов и разного назначения, выполненными в последние 15 лет в отдельных районах бассейна, и бурением многочисленных колонковых и особенно глубоких нефтеразведочных скважин, пройденных в последние 5 лет в целях изучения нефтегазоносности отдельных районов и структур бассейна.

Гидрогеологические съемки и бурение скважин показали, что общее синклинальное строение Якутского артезианского бассейна осложнено наличием ряда более мелких синклинальных структур, к которым приурочены бассейны второго порядка (Мухтуйско-Ботамайско-Нюйский, Черендейско-Бирюкский и многие другие), и что в зависимости от географического положения отдельных районов бассейна, изменения мощности и температуры многолетнемерзлых горных пород, геолого-структурных особенностей отдельных районов в бассейне имеют место разнообразные условия формирования подземных вод, вплоть до появления в районах развития мезокайнозоя на больших глубинах (1750—2000 м) пресных, слабоминерализованных гидрокарбонатно-натриевых и хлоридных вод.

Вместе с тем проведенные гидрогеологические исследования дают возможность говорить о большом разнообразии условий залегания и режима водоносных горизонтов, областей их питания, напора и дренирования, а также о разнообразии выходов подземных вод на поверхность в виде разноразмерных источников.

2. Некоторые элементы классификации подземных вод бассейна¹

Чтобы охарактеризовать химический состав подземных вод Якутского артезианского бассейна, разделим эти воды по геолого-стратиграфическому признаку на три большие группы: 1) воды допалеозойских образований; 2) палеозойских отложений; 3) мезокайнозойских отложений.

Воды допалеозойских образований связаны с кристаллическими горными породами докембрия (гранито-гнейсами, кристаллическими сланцами), которые по районированию подземных вод СССР, предложенному Н. И. Толстихиным, составляют Алданский и Анабарский гидрогеологические массивы. Эти же породы участвуют в строении фундамента Якутского артезианского бассейна. Относительно зоны многолетнемерзлых горных пород рассматриваемые подземные воды залегают под зоной мерзлых пород, внутри зоны и над ее верхней поверхностью. По условиям залегания и характеру вмещающих воду горных пород среди этих вод можно выделить: а) грунтовые трещинные деятельного слоя, сложенного сильно трещиноватыми кристаллическими породами;²

¹ Приводим лишь некоторые элементы этой классификации.

² Местами, где широко развиты элювий, пролювий, делювий, аллювий, покрывающие кристаллические породы, деятельный слой имеет сложное строение. В разрезе в таких местах бывают распространены грунтовые поровые воды, гидравлически связанные с грунтовыми трещинными водами. Первые по всем признакам относятся к грунтовым водам четвертичного покрова, поэтому рассматриваются ниже.

- б) трещинные, залегающие в зоне мерзлых кристаллических пород;
в) трещинные, залегающие под зоной мерзлых кристаллических пород.

По гидравлическим свойствам воды докембрийских пород можно разделить на напорные (трещинные воды указанных типов б и в) и периодически напорные грунтовые трещинные воды деятельного слоя, приобретающие местный, меняющийся во времени напор в период постепенного промерзания водоносных горизонтов с наступлением зимы.

Химический состав вод кристаллических пород докембрия в Якутском бассейне не изучен, если не считать единичных анализов В. В. Узембло [6], по данным которого подземные воды, непосредственно связанные с этими породами, относятся к гидрокарбонатным слабо-минерализованным, т. е. характерны для зоны интенсивного водообмена.

В южной части Якутского артезианского бассейна для областей питания палеозойских водоносных горизонтов, граничащих с породами допалеозоя, также характерны пресные слабоминерализованные воды гидрокарбонатного, реже сульфатного состава. При этом местами воды Алданского массива бывают гидравлически связаны с водами палеозойских отложений. Поэтому воды палеозоя, кроме атмосферных осадков, непосредственно выпадающих на площади питания палеозойских водоносных горизонтов, получают питание за счет вод Алданского массива.

Воды палеозойских отложений связаны с породами различных свит нижнего, среднего и верхнего кембрия, ордовика и силура. Они залегают и ниже, и в пределах зоны многолетнемерзлых горных пород.¹ По условиям залегания и характеру вмещающих воду горных пород воды палеозойских отложений относятся к трещинно-пластовым, трещинно-пластово-карстовым и реже порово-пластовым. По гидравлическим свойствам эти воды относятся к напорным, при этом для водоносных горизонтов характерно несовпадение областей питания горизонтов с областями их распространения.

Воды мезокайнозойских отложений связаны с породами юры, мела, третичными породами и породами четвертичного возраста аллювиального, элювиального, делювиального и пролювиального происхождения, покрывающими юрско-меловые, третичные и палеозойские отложения, а в районах Алданского и Анабарского массивов — породы докембрия. Относительно зоны многолетнемерзлых горных пород воды мезокайнозоя залегают под зоной, внутри зоны и над ее верхней поверхностью. По условиям залегания и характеру вмещающих воду горных пород среди этих вод можно выделить грунтовые воды, приуроченные к деятельному слою и подрусловым таликам,² сложенным различными по

¹ Здесь не отмечаются воды аллювия, элювия, делювия и пролювия, которые покрывают палеозойские породы и участвуют в строении деятельного слоя, так как эти образования входят в комплекс пород четвертичного возраста. К этим породам приурочены грунтовые воды, рассматриваемые при характеристике вод мезокайнозойских отложений. Грунтовые же воды, залегающие и циркулирующие в трещиноватой сильно выветренной зоне палеозойских пород, в силу почти повсеместного покрытия последних рыхлыми четвертичными осадками, а также частой гидравлической связи грунтовых трещинных вод с водами этих осадков не имеют на территории Якутского артезианского бассейна широкого распространения по площади.

² Имеются в виду несквозные талики. Воды сквозных таликов занимают особое положение среди подземных вод области распространения многолетнемерзлых горных пород. Относительно зоны мерзлых пород эти воды залегают в пределах данной зоны и гидравлически связаны: а) с водами, залегающими над и под зоной мерзлых пород (при отсутствии водоупоров под нижней поверхностью мерзлых пород); б) с водами, залегающими только над верхней поверхностью мерзлых горных пород (при наличии под зоной водоупорных пород). Сквозные талики являются своеобразными областями питания и разгрузки многих водоносных горизонтов, развитых под зоной мерзлых пород.

составу и происхождению рыхлыми породами четвертичного возраста, аллювиальные поровые воды — в речных долинах, где мощность аллювия превышает мощность мерзлых пород, и в долинах рек, в которых песчаные талые слои чередуются с глинистыми мерзлыми слоями (слоистое строение зоны мерзлых пород), порово-пластовые, трещинно-порово-пластовые и трещинно-пластовые — в талых горных породах юры и мела, залегающие под зоной или в зоне мерзлых горных пород.¹ По гидравлическим свойствам воды мезокайнозоя и аллювиальные воды относятся к напорным, грунтовые воды деятельного слоя и подрусловых таликов — к периодически напорным.

Области питания для грунтовых вод в летний период совпадают с областями их распространения. В зимний период грунтовые водоносные горизонты промерзают, за исключением мощных подрусловых таликов и грунтовых потоков деятельного слоя, сложенного рыхлыми породами с высокими фильтрационными свойствами. В процессе промерзания грунтовые воды приобретают местный меняющийся во времени напор. Для пластовых вод юры и мела и аллювиальных напорных вод характерно несовпадение областей питания с областями распространения и относительное постоянство напора в течение года.

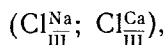
3. Химический состав подземных вод бассейна

Для характеристики солевого и газового состава подземных вод бассейна нами обработано более 160 анализов по подземным водам, свыше 60 — по поверхностным и около 60 — по газам, растворенным в подземных водах. Здесь приводим только наиболее характерные анализы вод для водоносных горизонтов, стратиграфически связанных с палеозойскими и мезокайнозойскими отложениями.²

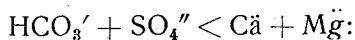
Состав вод палеозойских отложений

Подземные воды палеозоя в южной и юго-западной частях Якутского артезианского бассейна залегают и циркулируют в породах толбинской (Ст₁¹), пестроцветной (Ст₁²), толбочанской (Ст₁⁴), олекминской (Ст₁⁵), чарской (Ст₁⁶) свитах нижнего кембрия, породах среднего кембрия (Ст₂), верхолденской свите верхнего кембрия (Ст₃), усть-кутской свите нижнего ордовика (О₁), в породах среднего и верхнего ордовика (О) и в меикской свите нижнего силура (S₁). Соответственно перечисленным ярусам и свитам приводим анализы подземных вод, выраженные формулой М. Г. Курлова.

Воды толбинской свиты (Ст₁¹) хлоридные, минерализованные вплоть до рассолов воды с высокой жесткостью, иногда с содержанием брома в повышенных концентрациях. По классификации О. А. Алекаина [1], они относятся к хлоридным, группам натрия и кальция, третьему типу



для которого характерно соотношение:



¹ К водам, залегающим в зоне мерзлых горных пород, нами относятся и подземные льды, которые имеют различные формы залегания (пласты, пропластки, линзы, массивы, штоки, жилы).

² Полная характеристика солевого и газового составов подземных вод по всему бассейну автором разрабатывается.

1. $M_{152,47} \frac{Cl\ 98,61\ SO_4\ 0,97\ HCO_3\ 0,068}{Na\ 66,02\ Ca\ 25,9\ Mg\ 8,08};$
 2. $M_{121,75} \frac{Cl\ 99,36\ HCO_3\ 0,18\ SO_4\ 0,001}{Na\ 67,42\ Ca\ 25,34\ Mg\ 7,24};$
 3. $M_{101,66} \frac{Cl\ 98,42\ SO_4\ 1,16\ HCO_3\ 0,04}{Na\ 67,97\ Ca\ 20,9\ Mg\ 10,4}\ BrO,38;$
 4. $M_{137,28} \frac{Cl\ 99,88\ HCO_3\ 0,1\ SO_4\ 0,02}{Na\ 64,1\ Ca\ 18,6\ Mg\ 17,3}$ (то же скв. 4);
 5. $M_{66,72} \frac{Cl\ 99,86\ HCO_3\ 0,12\ SO_4\ 0,02}{Na\ 63,56\ Ca\ 23,66\ Mg\ 12,78}$ (то же скв. 39);
 6. $M_{45,66} \frac{Cl\ 94,6\ SO_4\ 5\ HCO_3\ 0,4}{Na\ 77,6\ Ca\ 13,74\ Mg\ 8,66}$ (пос. Алексеевка);
 7. $M_{293,69} \frac{Cl\ 98,2\ HCO_3\ 0,2}{Ca\ 65,99\ Na\ 22\ Mg\ 10,61}$
 8. $M_{300,8} \frac{Cl\ 98,92\ SO_4\ 1,16\ HCO_3\ 0,04}{Na\ 67,97\ Ca\ 20,9\ Mg\ 10,4}$
- (р. Толба, скв. 2);
- (р. Намана, скв. 2 нефтеразведочная).

Воды пестроцветной свиты ($Ст_1^2$) нижнего кембрия относятся к сульфатным, группе кальция, второму типу (S_{II}^{Ca}), для которого характерно соотношение $HCO_3' < Ca'' + Mg < HCO_3' + SO_4''$:

9. $M_{1,33} \frac{SO_4\ 76,68\ HCO_3\ 21,25\ Cl\ 2,02}{Ca\ 72,5\ Mg\ 23\ Na\ 4,5}$ (р. Улукан, источник);
 10. $M_{0,77} \frac{SO_4\ 59,14\ HCO_3\ 38,06\ Cl\ 2,8}{Ca\ 69,92\ Na\ 10,6\ Mg\ 9,78}$
 11. $M_{0,71} \frac{SO_4\ 55,16\ HCO_3\ 41,8\ Cl\ 3,04}{Ca\ 71,24\ Mg\ 14,6\ Na\ 14,16}$
- (р. Толба, источник).

Воды толбачанской свиты ($Ст_1^4$). В толбачанской свите широко распространением пользуются сульфатные и хлоридные воды — причем первые, по О. А. Алекину, относятся к группе кальция, второму типу (S_{II}^{Ca}), вторые — к группе натрия, третьему типу (Cl_{III}^{Na}):

12. $M_{0,98} \frac{SO_4\ 65,46\ HCO_3\ 27,66\ Cl\ 6,88}{Ca\ 64,68\ Mg\ 35,58\ Na\ 2,8}$ (р. Лена, источник);
13. $M_{0,59} \frac{SO_4\ 54,9\ HCO_3\ 40,7\ Cl\ 4,4}{Ca\ 63,2\ Mg\ 36,8}$ (р. Толбачан, источник);
14. $M_{8,3} \frac{Cl\ 63,08\ SO_4\ 35,02\ HCO_3\ 1,9}{Na\ 59,4\ Ca\ 25,08\ Mg\ 15,52}$
15. $M_{8,87} \frac{Cl\ 65,48\ SO_4\ 32,7\ HCO_3\ 1,82}{Na\ 61,96\ Ca\ 23,54\ Mg\ 14,5}$
16. $M_{39,2} \frac{Cl\ 87,9\ SO_4\ 11,7\ HCO_3\ 0,29}{Na\ 85,8\ Ca\ 8,5\ Mg\ 5,58}$ (р. Б. Мурбай, источник);
17. $M_{9,629} \frac{Cl\ 75,5\ SO_4\ 21,63\ HCO_3\ 2,86}{Na\ 73,4\ Ca\ 23,6\ Mg\ 2,98}$ (р. Намана, источник выше пос. Мякинда);
18. $M_{14,46} \frac{Cl\ 84,1\ SO_4\ 14,3\ HCO_3\ 1,65}{Na\ 80,3\ Ca\ 12,9\ Mg\ 6,8}$ (р. Солянка, источник);

19. $M_{7,8} \frac{Cl\ 87,34\ SO_4\ 8,32\ HCO_3\ 4,04}{Na\ 16,84\ Ca\ 15,54\ Mg\ 7,62}$
20. $M_{183,9} \frac{Cl\ 96,7\ SO_4\ 3,3\ HCO_3\ 0,05}{Na\ 96,1\ Ca\ 2,72\ Mg\ 1,18}$
21. $M_{206,5} \frac{Cl\ 99,42\ SO_4\ 0,42\ HCO_3\ 0,06}{Na\ 98,85\ Ca\ 0,84\ Mg\ 0,21}$
22. $M_{92,164} \frac{Cl\ 93,9\ SO_4\ 5,9\ HCO_3\ 0,2}{Na\ 94\ Ca\ 4,3\ Mg\ 1,6}$ (р. Намана, источник у б. Сольза-вода);
23. $M_{21,75} \frac{Cl\ 84,24\ SO_4\ 15\ HCO_3\ 0,76}{Na\ 82,08\ Mg\ 9,16\ Ca\ 8,76}$ (источник у пос. Ет-Кель);
24. $M_{5,97} \frac{Cl\ 79,2\ SO_4\ 17,4\ HCO_3\ 3,4}{Na\ 78,8\ Ca\ 14,4\ Mg\ 6,9}$ (р. Лена, источник у дер. Нохтуйской);
25. $M_{9,77} \frac{Cl\ 88\ SO_4\ 9,9\ HCO_3\ 2,1}{Na\ 88,7\ Ca\ 8,5\ Mg\ 4,8}$ (р. Нюя, источник).

Воды чарской свиты ($См_1^6$). Для чарской свиты нижнего кембрия характерны гидрокарбонатные (Cl_{II}^{Ca}), сульфатные (S_{II}^{Ca}) и хлоридные воды (Cl_{II}^{Na}):

26. $M_{0,413} \frac{HCO_3\ 61,1\ SO_4\ 24,95\ Cl\ 13,95}{Ca\ 54,1\ Mg\ 31,2\ Na\ 14,7}$ (р. Лена, источник у д. Русская речка);
27. $M_{0,414} \frac{HCO_3\ 58,1\ SO_4\ 40,4\ Cl\ 1,5}{Ca\ 67,6\ Mg\ 31,3\ Na\ 1,1}$ (источник у дер. Харинцы);
28. $M_{0,358} \frac{HCO_3\ 75\ SO_4\ 23,1\ Cl\ 1,9}{Ca\ 60,4\ Mg\ 38,2\ Na\ 1,4}$ (источник у устья р. Тымнулах);
29. $M_{4,15} \frac{SO_4\ 56,4\ Cl\ 37,56\ HCO_3\ 6,04}{Ca\ 53,38\ Na\ 38,22\ Mg\ 8,4}$ (источник в районе г. Олекминска)
30. $M_{0,743} \frac{SO_4\ 67,9\ Cl\ 17,18\ HCO_3\ 14,92}{Mg\ 63,8\ Ca\ 36,04\ Na\ 0,16}$ (р. Олекма, источник);
31. $M_{4,43} \frac{SO_4\ 51,1\ Cl\ 44,1\ HCO_3\ 4,8}{Ca\ 45,5\ Na\ 43\ Mg\ 11,5}$ (левый берег р. Наманы, источник у эимской структуры);
32. $M_{4,396} \frac{SO_4\ 50,05\ Cl\ 43,4\ HCO_3\ 6,55}{Ca\ 47,1\ Na\ 42,1\ Mg\ 10,8}$ (правый берег р. Наманы, источник у эимской структуры);
33. $M_{2,92} \frac{Cl\ 47,52\ SO_4\ 42,66\ HCO_3\ 9,82}{Na\ 57,72\ Ca\ 33,42\ Mg\ 8,86}$ (р. Олекма, источник);
34. $M_{7,382} \frac{Cl\ 70\ SO_4\ 29,6\ HCO_3\ 0,4}{Na\ 71\ Ca\ 28,6\ Mg\ 0,4}$ (левый берег р. Лены, источник в 3 км южнее Олекминска);
35. $M_{8,13} \frac{Cl\ 69,7\ SO_4\ 27,12\ HCO_3\ 3,18}{Na\ 75,36\ Ca\ 14,48\ Mg\ 10,16}$ (левый берег р. Чары, источник).

Воды среднего кембрия ($См_2$). В среднем кембрии подземные воды залегают и циркулируют в трещиноватых, часто закарстованных известняках, причем в зоне дренирующего влияния р. Лены и ее притоков они гидрокарбонатные. Обычный состав их может быть выражен анализом воды, отобранной из Качикатченского источника:

36. $M_{0,16} \frac{HCO_3\ 93,31\ SO_4\ 5,28\ Cl\ 1,41}{Ca\ 60,91\ Mg\ 31,69\ Na\ 7,4}$ (Качикатченский источник в 10 км южнее села Покровское).

Воды верхоленской свиты ($Ст_3$) залегают и циркулируют в огипсованных доломитах и доломитизированных известняках, подстилаемых и покрываемых глинистыми, часто гипсоносными горными породами. Характер среды, с которой связаны воды верхолена, является главным фактором формирования их солевого состава. Они, как и следовало ожидать, являются сульфатно-кальциевыми второго типа (S_{II}^{Ca}). Приводимые анализы отобраны из источников, выходящих выше уровня воды в реках:

37. $M_{1,685} \frac{SO_4 87,2 \text{ HCO}_3 8,6 \text{ Cl } 4,2}{Ca 62,4 \text{ Mg } 32 \text{ Na } 5,7}$ (р. Б. Черепениха, источник в 18 км от устья);
38. $M_{0,704} \frac{SO_4 52,05 \text{ NCO}_3 42,96 \text{ Cl } 4,99}{Ca 64,91 \text{ Mg } 34,3 \text{ Na } 0,2}$ (источник в 4 км от устья);
39. $M_{1,089} \frac{SO_4 73,6 \text{ HCO}_3 18,42 \text{ Cl } 7,98}{Ca 56,8 \text{ Mg } 35,6 \text{ Na } 7,2}$ (правый берег р. Лены, источник у г. Эбетас);
40. $M_{1,125} \frac{SO_4 69,9 \text{ HCO}_3 22 \text{ Cl } 8,1}{Ca 53,9 \text{ Mg } 38,9 \text{ Na } 7,2}$ (левый берег р. Лены, источник);
41. $M_{1,483} \frac{SO_4 81,1 \text{ HCO}_3 13,3 \text{ Cl } 5,6}{Ca 63,5 \text{ Mg } 31,8 \text{ Na } 4,7}$ (р. Бирюк, источник, в 12 км от устья);
42. $M_{1,746} \frac{SO_4 81,1 \text{ HCO}_3 17,5 \text{ Cl } 1,4}{Ca 81,4 \text{ Mg } 18,4 \text{ Na } 0,2}$ (источник).

Воды усть-кутской свиты (O_I). В усть-кутской свите имеют распространение два класса вод — сульфатные кальциевые второго типа (S_{II}^{Ca}) и гидрокарбонатные кальциевые второго типа (S_{II}^{Ca}). Первые характерны для водоносных горизонтов нижнего ордовика, нижним водоупором которых являются глинистые, огипсованные породы верхнего кембрия, вторые — для водоносных горизонтов, залегающих в более высокой части разреза данной свиты. Приводим анализы вод усть-кутской свиты нижнего ордовика:

43. $M_{1,165} \frac{SO_4 73,12 \text{ HCO}_3 24,86 \text{ Cl } 2,02}{Ca 72,82 \text{ Mg } 25,46 \text{ Na } 1,72}$
44. $M_{2,18} \frac{SO_4 77,1 \text{ HCO}_3 13,8 \text{ Cl } 9,1}{Ca 70,99 \text{ Mg } 22,3 \text{ Na } 6,71}$ } (р. Бирюк, источник);
45. $M_{1,75} \frac{SO_4 59,6 \text{ HCO}_3 39,8 \text{ Cl } 0,6}{Ca 64,4 \text{ Mg } 35,04 \text{ Na } 0,56}$ (источник в 6 км выше устья р. Меличан);
46. $M_{0,55} \frac{HCO_3 51,3 \text{ SO}_4 46,5 \text{ Cl } 2,2}{Ca 55,6 \text{ Mg } 41,8 \text{ Na } 2,6}$ (правый берег р. Лены, источник у г. Эбетас);
47. $M_{0,53} \frac{HCO_3 63,6 \text{ SO}_4 32,2 \text{ Cl } 4,2}{Ca 61,4 \text{ Mg } 33,8 \text{ Na } 4,8}$ (правый берег р. Лены, источник).

Воды среднего и верхнего ордовика (O_{2+3}). В породах среднего и верхнего ордовика залегают и циркулируют гидрокарбонатные кальциевые (S_{II}^{Ca}), сульфатные кальциевые (S_{II}^{Ca}) и хлоридные натриевые воды второго типа (Cl_{II}^{Na}):

48. $M_{0,874} \frac{HCO_3 72,2 \text{ SO}_4 22,8 \text{ Cl } 5}{Ca 60,6 \text{ Mg } 32 \text{ Na } 1,4}$ (правый берег р. Лены, источник у дер. Березово);
49. $M_{0,406} \frac{HCO_3 72,8 \text{ SO}_4 19,8 \text{ Cl } 7,4}{Ca 58,8 \text{ Mg } 39 \text{ Na } 2,2}$ (р. Лена, источник);

50. $M_{0,5} \frac{\text{HCO}_3 56,9 \text{ SO}_4 37,2 \text{ Cl } 5,9}{\text{Ca } 52,3 \text{ Mg } 45,1 \text{ Na } 2,6}$ (р. Меличан, источник);
51. $M_{0,518} \frac{\text{SO}_4 25,6 \text{ NCO}_3 39,19 \text{ NO}_3 1,08 \text{ Cl } 0,13}{\text{Ca } 50,55 \text{ Mg } 41,75 \text{ Na } 7,57}$ (р. Нюя, источник);
52. $M_{0,605} \frac{\text{SO}_4 57,6 \text{ HCO}_3 36 \text{ Cl } 6,4}{\text{Ca } 64,2 \text{ Mg } 21,4 \text{ Na } 14,4}$ (р. Лена, источник);
53. $M_{1,471} \frac{\text{Cl } 50,74 \text{ HCO}_3 44,68 \text{ SO}_4 4,58}{\text{Na } 52,6 \text{ Ca } 26,22 \text{ Mg } 21,19}$ (р. Б. Черепаниха, источник);
54. $M_{7,54} \frac{\text{Cl } 65,06 \text{ SO}_4 32,08 \text{ HCO}_3 2,25 \text{ CO}_3 0,41}{\text{Na } 58,4 \text{ Ca } 33,96 \text{ Mg } 7,64}$ (р. М. Дельгей, источник).

Воды меикской свиты (S_1). С породами меикской свиты, залегающими в зоне дренирующего влияния гидрографической сети, в южной части Якутского артезианского бассейна связаны гидрокарбонатные кальциевые воды второго типа ($\text{C}_{II}^{\text{Ca}}$):

55. $M_{0,314} \frac{\text{HCO}_3 89,2 \text{ SO}_4 9,08 \text{ Cl } 1,72}{\text{Ca } 64,38 \text{ Mg } 29,98 \text{ Na } 5,04}$ (р. Джерба, источник);
56. $M_{0,294} \frac{\text{HCO}_3 65 \text{ SO}_4 35}{\text{Ca } 60 \text{ Mg } 35,75 \text{ NH}_4 4 \text{ Na } 0,25}$
57. $M_{0,343} \frac{\text{HCO}_3 68,68 \text{ SO}_4 31,33}{\text{Ca } 55,58 \text{ Mg } 43,99 \text{ Na } 0,43}$ } (р. Меличан, источник).

Состав вод мезокайнозойских отложений

Подземные воды мезокайнозоя приурочены к водопроницаемым породам юры и мела, широко развиты в центральной и северной частях Якутского артезианского бассейна и к четвертичным отложениям, распространенным на всей территории бассейна и покрывающим породы допалеозоя (районы Алданского и Анабарского массивов), палеозоя (южные, юго-западные и северные районы), юры и мела (центральные и северные районы).

Воды юрских отложений связаны с водопроницаемыми разностями песчаников и конгломератов юры, иногда образующих большие по мощностям, но слабые по фильтрационным свойствам водоносные горизонты (окрестности Якутска, район устья р. Алдана и др.).

Воды юрских отложений по классификации О. А. Алекина относятся к гидрокарбонатным кальциевым первого и второго типов (C_I^{Ca} , $\text{C}_{II}^{\text{Ca}}$), гидрокарбонатным магниевым первого и второго типов (C_I^{Mg} , $\text{C}_{II}^{\text{Mg}}$), гидрокарбонатным натриевым первого типа (C_I^{Na}), хлоридным натриевым первого и третьего типов (Cl_I^{Na} , $\text{Cl}_{III}^{\text{Na}}$):

58. $M_{0,19} \frac{\text{HCO}_3 89,17 \text{ SO}_4 0,83}{\text{Ca } 55,78 \text{ Mg } 32,23 \text{ Na } 11,99}$ (р. Виллой, источник [в 4 км ниже устья р. Кемпендяй]);
59. $M_{0,1565} \frac{\text{HCO}_3 97,1 \text{ Cl } 2,9}{\text{Mg } 53,99 \text{ Ca } 43,69 \text{ Na } 2,43}$ (р. Джели, источник);
60. $M_{0,084} \frac{\text{HCO}_3 89,3 \text{ Cl } 10,7}{\text{Mg } 35,7 \text{ Ca } 35,7 \text{ Na } 21,4}$ (р. Виллой, источник);
61. $M_{0,294} \frac{\text{HCO}_3 98,4 \text{ Cl } 1,6}{\text{Ca } 54,84 \text{ Mg } 39,39 \text{ NH}_4 4,2 \text{ Na } 1,6}$ (р. Бирюк, источник);
62. $M_{0,448} \frac{\text{HCO}_3 77,05 \text{ SO}_4 22,45 \text{ Cl } 0,5}{\text{Ca } 49,6 \text{ Mg } 49 \text{ NH}_4 0,9 \text{ Na } 0,5}$ (р. Намана, источник у контакта юры с верхним кембрием);

63. $M_{0,39} \frac{\text{HCO}_3 71,82 \text{ Cl } 26,23 \text{ SO}_4 1,94}{\text{Na } 60,08 \text{ Ca } 28,04 \text{ Mg } 11,86}$ (правый берег р. Алдана, скважина с глубины 904 м);
64. $M_{0,92} \frac{\text{Cl } 51,92 \text{ HCO}_3 46,74 \text{ SO}_4 1,34}{\text{Na } 98,56 \text{ Ca } 1,96 \text{ Mg } 0,48}$ (правый берег р. Алдана, скв. 2 при забое 510 м);
65. $M_{0,791} \frac{\text{HCO}_3 50,18 \text{ Cl } 49,38 \text{ SO}_4 1,44}{\text{Na } 87,46 \text{ Ca } 9,32 \text{ Mg } 3,22}$ (то же, но при забое 1500 м);
66. $M_{70,625} \frac{\text{Cl } 99,9 \text{ HCO}_3 0,1}{\text{Na } 79,49 \text{ Ca } 20,48 \text{ Mg } 2,14}$ (Китчанская глубокая скв. 1 с глубины 942 м);
67. $M_{0,447} \frac{\text{HCO}_3 75,6 \text{ Cl } 16,4 \text{ SO}_4 8}{(\text{Na} + \text{K}) 91 \text{ Ca } 9}$ (Вилуйская скважина с глубины 2012—2015 м, [1]);
68. $M_{23} \frac{\text{Cl } 99,5 \text{ HCO}_3 0,5}{\text{Na } 65,8 \text{ Ca } 31,1 \text{ Mg } 3,1}$ Br 3У0,0137 (Китчанская глубокая скв. 2 с глубины 1135 м);
69. $M_{1,2} \frac{\text{SO}_4 44 \text{ HCO}_3 31 \text{ Cl } 25}{(\text{Na} + \text{K}) 84 \text{ Mg } 10 \text{ Ca } 6}$ (Якутская скв. 1);
70. $M_{1,4} \frac{\text{HCO}_3 49 \text{ SO}_4 29 \text{ Cl } 22}{\text{Na } 86 \text{ Mg } 10 \text{ Ca } 4}$ (Якутская скв. 2);
71. $M_{0,285} \frac{\text{HCO}_3 75 \text{ SO}_4 24,4}{\text{Ca } 54 \text{ Mg } 45,6}$ (р. Намана, источник).

Воды меловых отложений по солевому составу относятся к хлоридным (Cl_I^{Na}), карбонатным натриевым (Cl_I^{Na}), гидрокарбонатным кальциевым (Cl_I^{Ca}):

72. $M_{0,61} \frac{\text{Cl } 61,4 \text{ HCO}_3 32 \text{ CO}_3 34 \text{ SO}_4 3,2}{(\text{Na} + \text{K}) 95 \text{ Ca } 5}$ (Вилуйская скважина с глубины 1756—1776 м [1]);
73. $M_{0,088} \frac{\text{HCO}_3 80,5 \text{ SO}_4 19,5}{\text{Ca } 50,85 \text{ Mg } 47,45 \text{ Na } 0,85 \text{ NH}_4 0,85}$ (р. Ерен-юрях, источник).

Воды деятельного слоя и подрусловых таликов в Якутском артезианском бассейне имеют более или менее постоянный гидрокарбонатный состав и только в районах развития гипсоносных и соленосных пород палеозоя (южные районы бассейна) часто приобретают сульфатный, хлоридный или более сложный состав, в котором содержатся Na, Ca, Mg, HCO_3 , Cl, SO_4 почти в равных концентрациях. Минерализация гидрокарбонатных вод обычно достигает 0,5 г/л, сульфатные, хлоридные и воды сложного состава обладают более повышенной минерализацией, выходящей за пределы 1 г/л.

Заключение

1. Якутский артезианский бассейн обладает огромнейшими запасами подземных вод, которые связаны с палеозойскими отложениями, образуя в них 10—12 водоносных горизонтов, различных по мощности, водообильности, условиям залегания, напору и характеру дренирования, и с мезокайнозойскими образованиями, где выявлено 5 водоносных горизонтов, залегающих над зоной, внутри зоны и под зоной мерзлых горных пород, при этом в палеозое преобладают трещинно-пластовые и карстово-трещинно-пластовые воды, в мезокайнозое — порово-пластовые и порово-трещинно-пластовые.

2. На территории Якутского артезианского бассейна отчетливо выделяются две большие по площади взаимосвязанные гидрогеологические области: внешняя, сложенная палеозойскими карбонатными, гипсоносными и соленосными горными породами с приуроченными к ним преимущественно минерализованными водами, и внутренняя,

сложенная песчано-глинистыми породами мезокайнозоя, в которых залегают пресные воды.

3. В вертикальном разрезе внешней (палеозойской) области распространения подземных вод на территории южной и юго-западной частей бассейна выделяются и прослеживаются три гидродинамические зоны: интенсивного, затрудненного и весьма затрудненного водообмена. Первая зона, ограниченная дренирующим влиянием р. Лены и ее притоков (в районе Олекминска), имеет мощность около 300—350 м; вторая и третья зоны залегают ниже местных базисов эрозии, и мощности их определяются особенностями геологических разрезов каждого района бассейна в отдельности (в Олекминском районе мощность второй зоны 500—600 м, третьей — 250—300 м).

4. В вертикальном разрезе внутренней (мезокайнозойской) области распространения подземных вод при современной изученности разреза мезокайнозоя можно выделить две гидрохимические зоны,¹ из которых первая ограничена глубиной около 1000 м (возможно, несколько больше) и вторая — свыше 1000 м.

5. Для первой вертикальной зоны в палеозое характерны гидрокарбонатные воды с минерализацией до 0,5—1 г/л, а для районов распространения гипсоносных и соленосных горных пород — сульфатные и хлоридные воды с минерализацией до 8—10 г/л (см. воды чарской свиты нижнего кембрия, среднего кембрия, верхоленской свиты верхнего кембрия, усть-кутской свиты нижнего ордовика, воды среднего и верхнего ордовика, меикской свиты нижнего силура), причем гидрокарбонатные воды обладают малой и умеренной жесткостью (до 15—20°) и являются вполне пригодными для водоснабжения.

Во второй и третьей гидродинамических зонах в палеозое широким распространением пользуются сульфатные и хлоридные высокоминерализованные, вплоть до рассолов, воды, не пригодные для водоснабжения (см. воды толбинской и тобачанской свит нижнего кембрия). Хлоридные воды часто содержат В, Вг, CN_4 и тяжелые углеводороды, реже J и нафтенновые кислоты, т. е. микрокомпоненты и газы, характерные для вод нефтяных месторождений.

В настоящее время проводится изучение этих вод для поисков на территории Якутского артезианского бассейна нефтеносных районов, площадей и структур по газо-гидрохимическим признакам.

6. Для первой гидрохимической зоны в мезокайнозое характерны гидрокарбонатно-сульфатные натриевые, сульфатно-гидрокарбонатные натриевые, сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, гидрокарбонатные магниевые-кальциевые и кальциевые-магниевые, хлоридно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые-натриевые, гидрокарбонатно-хлоридные натриевые пресные воды, обладающие малой жесткостью и имеющие минерализацию до 1,4 г/л. Гидрокарбонатно-сульфатные натриевые и сульфатно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые воды используются в настоящее время для водоснабжения г. Якутска.

Для второй гидрохимической зоны в мезокайнозое характерны два типа вод: хлоридные высокоминерализованные, содержащие Вг, и J, встречаемые в районах крупных антиклинальных структур, нарушенных радиальными дислокациями и на больших (> 2000 м) глубинах

¹ В разрезе глубоких депрессий, сложенных мезокайнозоем и, вероятно, верхним и нижним палеозоем (предверхоянская депрессия, район Вилуйска), вполне возможно наличие третьей зоны подземных вод. По-видимому, воды третьей зоны в палеозойских и мезозойских породах будут хлоридные высокоминерализованные, о чем свидетельствуют первые анализы воды, отобранной из Намской скважины с глубины около 3000 м (по устному сообщению Е. А. Баскова).

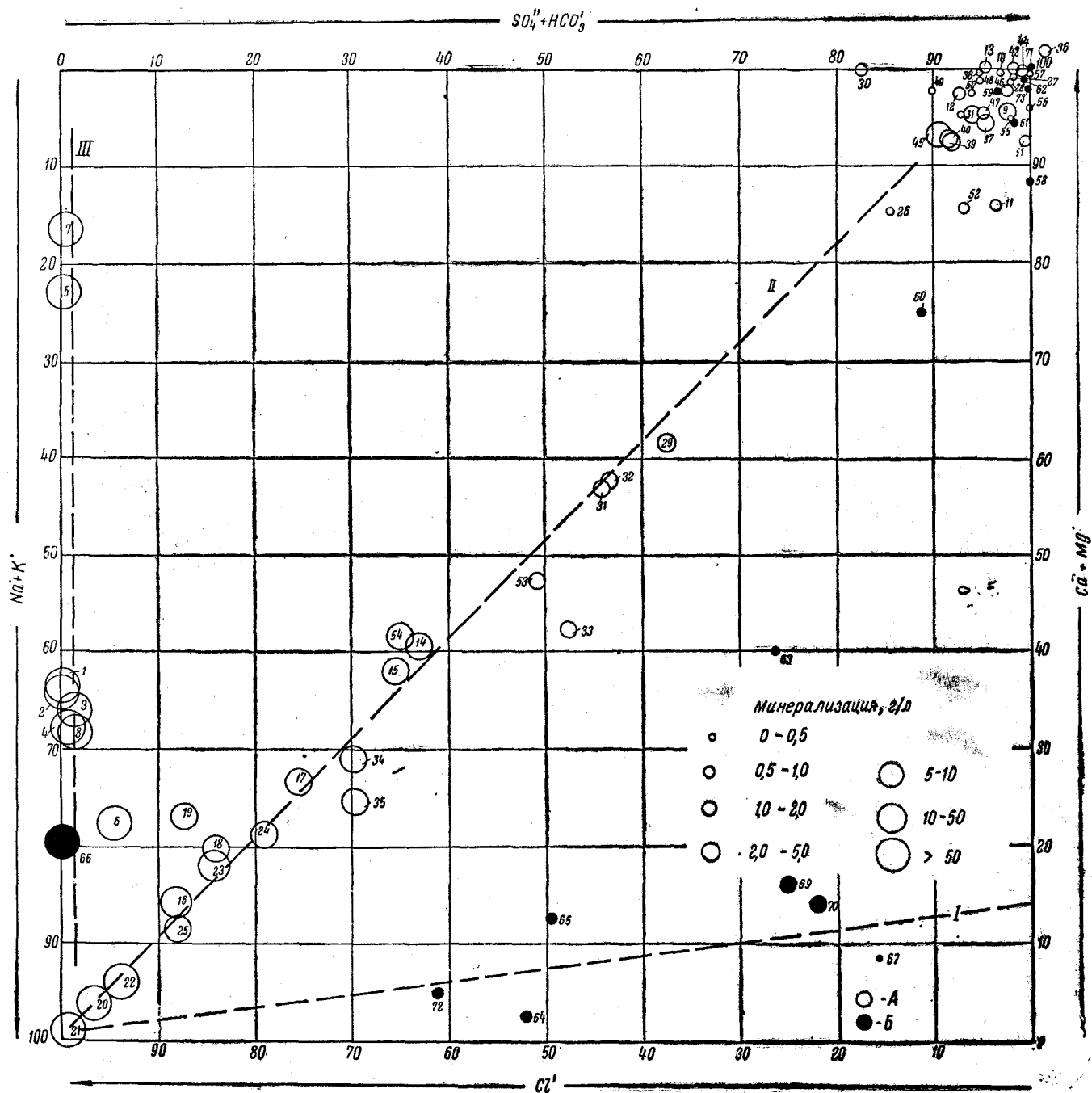


Рис. 3. График химического состава подземных вод Якутского артезианского бассейна.
(составлен В. М. Максимовым). Подземные воды:

А — палеозойских отложений: 1 — 8 — Толбинской свиты Ст₁¹; 9 — 11 — Пестроцветной свиты Ст₁²; 12 — 25 — Толбачанской свиты Ст₁⁴; 26 — 35 — Чарской свиты Ст₁⁶; 36 — среднего кембрия Ст₂; 37 — 42 — Верхоненской свиты Ст₃; 43 — 47 — Усть-кутской свиты О₁; 48 — 54 — среднего и верхнего ордовика О₂+3; 55 — 57 — Мелской свиты S₁; Б — мезокайнозойских отложений; 58 — 71 — юрских отложений; 72 — 73 — меловых отложений

в мезозое (Китчанская структура, район устья Вилюя, Намская скважина и др.) и гидрокарбонатно-натриевые слабоминерализованные воды. Формирование солевого состава хлоридных вод мезокайнозоя, по-видимому, обязано палеозойским водам, поступающим в юрско-меловые водоносные горизонты по трещинам радиальных дислокаций и по пластам палеозойских пород, погружающихся в сторону Вилюйской впадины (в местах стратиграфических контактов палеозоя с мезозоем в разрезах периферийных частей этой впадины). Происхождение же гидрокарбонатно-натриевых слабоминерализованных вод, залегающих на больших глубинах в мезокайнозое (Вилюйская скважина), остается пока загадочным. Вполне возможно, что формирование солевого состава вод является следствием ионного обмена.

Вскрытие этих вод на больших глубинах (примерно 2000 м) является новым результатом гидрогеологического изучения Якутского артезианского бассейна. Оконтуривание площадей распространения этих вод — ближайшая задача гидрогеологов-мерзлотоведов.

7. Для выяснения условий формирования солевого состава подземных вод в Якутском артезианском бассейне мы воспользовались графиком К. Крейчи-Графа [9] (рис. 3). На графике можно провести три линии: *I* — характерную для вод закрытых разрезов; *II* — для подземных вод, формирование солевого состава которых во многом обязано смещению вод верхних и нижних горизонтов (открытые разрезы); *III* — для подземных вод полузакрытых гидрогеологических разрезов. Как видно из графика, для водоснабжения по минерализации и составу в большинстве своем являются пригодными подземные воды открытых гидрогеологических разрезов, группирующиеся в правом верхнем углу графика.

8. Результаты анализов подземных вод и построенный по ним график свидетельствуют о том, что химический состав подземных вод Якутского артезианского бассейна определяется:

а) литолого-фациальными особенностями разрезов отдельных районов бассейна;

б) структурными условиями как всего бассейна, так и отдельных его частей и районов;

в) физико-географическими условиями бассейна в целом и его отдельных районов в частности;

г) гидрогеологическим режимом водоносных горизонтов бассейна (интенсивностью процесса водообмена, водопроницаемостью пород, мощностью и характером¹ зоны мерзлых пород и пр.);

д) геологической историей развития бассейна.

Следствием этого и является распространение в Якутском артезианском бассейне пресных и минерализованных гидрокарбонатных, сульфатных и хлоридных вод, так как перечисленные факторы предопределяют такие процессы формирования солевого состава подземных вод, как катионный обмен при движении вод в горных породах, обогащение вод ионами SO_4^{2-} и Cl^- , смешение вод, обогащение гидрокарбонатами натрия, изменение минерализации, десульфирование вод и многие другие.

9. Сопоставление химического состава подземных вод с геологическими разрезами отдельных частей бассейна, его структурными особенностями, наличием зоны многолетнемерзлых горных пород и эрозионным расчленением бассейна дает основание считать, что глубина

¹ В отношении наличия сквозных таликов, их размеров и связи с поверхностными и грунтовыми водами.

скважин для водоснабжения в южной части Якутского артезианского бассейна, где развит нижний палеозой, определяется в 300—350 м (на приводораздельных склонах и поверхностях высоких речных террас); в центральной части бассейна, сложенной мезокайнозойскими породами, скважины для получения пресных вод могут проектироваться глубиной от 300 до 650 м.

Использованная литература

1. Алекин О. А. Основы гидрохимии. Гидрометеониздат, 1953.
2. Анисимова Н. П. О химическом составе подземных вод некоторых глубоких горизонтов на территории Центральной Якутии. Мат. к основам учения о мерзлых зонах земной коры. Изд-во АН СССР, 1956, вып. III.
3. Андреева О. Н. Стратиграфия ордовикских отложений р. Лены и р. Илим. Мат. по геологии Сибирской платформы. Госгеолиздат, 1955.
4. Арсеньев А. А. и Иванова В. А. К стратиграфии палеозоя и мезозоя среднего течения р. Вилюй. Вопросы геологии Азии, т. I. Изд-во АН СССР, 1954.
5. Вахромеев В. А. и Пущаровский Ю. М. О геологической истории Вилюйской впадины и прилегающей части Приверхоянского краевого прогиба в мезозойское время. Вопросы геологии Азии, т. I. Изд-во АН СССР, 1954.
6. Вельмина Н. А., Узембло В. В. Подземные воды Алданского кристаллического массива и южной части междуречья Алдан и Лена. Тр. СОПСа. АН СССР, 1956, № 12.
7. Ефимов А. И. Якутский артезианский бассейн подмерзлотных вод. Изв. АН СССР, серия геол., 1945, № 4.
8. Краснов И. И. и Масайтис В. Л. Тектоника Оленекско-Вилюйского водораздела в связи со строением окраинных зон Тунгусской синеклизы. Вопросы геологии Азии, т. I. Изд-во АН СССР, 1954.
9. Крейчи-Граф К. Основные вопросы нефтяной геологии. ОНТИ, 1934.
10. Максимов В. М. Источники окрестностей г. Якутска. Зап. ЛГИ, 1941, т. XIV.
11. Максимов В. М. и Толстихин Н. И. К вопросу о гидрогеологических условиях окрестностей г. Якутска. ДАН СССР, 1940, т. 28.
12. Максимов В. М. Подземные воды окрестностей г. Олекминска (ЯАССР). Зап. ЛГИ, 1955, т. XXXI.
13. Мельников П. И. и Ефимов А. И. Опыт эксплуатации подземных вод в области распространения вечной мерзлоты Центральной Якутии. Изд-во АН СССР, 1953.
14. Мельников П. И. и Анисимова Н. П. О радиоактивности вод источников долины среднего течения р. Лены Олекминского и Орджоникидзевого районов ЯАССР. Сб. Исследование вечной мерзлоты в ЯАССР. Изд-во АН СССР, 1952, вып. 3.
15. Никифорова О. И. Новые данные о стратиграфии и палеографии ордовика и силура Сибирской платформы. Мат. по геологии Сибирской платформы. Госгеолиздат, 1955.
16. Толстихин Н. И. Артезианские воды мерзлой зоны в пределах СССР. Мерзлотоведение. 1947, т. II, вып. 1.
17. Толстихин Н. И., Максимов В. М. Якутский артезианский бассейн. Зап. ЛГИ, 1955, т. XXXI.
18. Чернышева Н. Е. Стратиграфия кембрийских отложений юго-восточной окраины Сибирской платформы. Мат. по геологии Сибирской платформы. Госгеолиздат, 1955.