

МЕТОДИКА ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГИДРАВЛИЧЕСКИМ МЕТОДОМ



А. В. Малков,
директор,
канд. геол.-минерал. наук
ООО «Нарзан-гидроресурсы»

Запасы подземных вод считаются обеспеченными, если в результате гидрогеологических исследований доказано, что понижение уровня в эксплуатационных скважинах не превысит допустимых пределов, не окажет существенного влияния на соседние участки и общую экологическую ситуацию, а качественный состав подземных вод будет отвечать установленному диапазону кондиций на протяжении всего периода эксплуатации. Перечисленные требования определяют и общую схему изучения подземных вод. В основе исследований лежит длительная (как правило, в течение года) откачка с дебитом на уровне заявленной потребности с полным комплексом гидрогеологических наблюдений за динамикой уровня подземных вод, минерализацией, компонентным и газовым составом, микробиологическими показателями. Иными словами, гидравлический метод основывается на данных фактических наблюдений и прогнозировании их на некоторую перспективу по определенным законам, которые в каждом конкретном случае обосновываются индивидуально.

В основу расчета положена следующая предпосылка: при длительном воздействии каптажных сооружений на пласт формируется квазистационарный режим фильтрации, что дает возможность разделить период исследований на две стадии: первая соответствует длительности откачек, а вторая, наиболее продолжительная, охватывает все остальное время, в том числе и период прогнозирования. В соответствии с этим полное понижение уровня может быть выражено двумя слагаемыми: срезкой уровня от работы скважины (группы скважин) и временной срезкой, вызванной сработкой запасов подземных вод.

Основное уравнение, используемое для расчета понижения уровня имеет вид [1]:

$$S(t) = S_0 + \sum_{j=1}^n S_j^{\nabla} + \Delta S(t), \quad (1)$$

где $S(t)$ – понижение уровня в рассматриваемой точке на

В сложных гидрогеологических условиях оценка запасов подземных вод выполняется, как правило, гидравлическим методом. В основном это относится к месторождениям минеральных вод, ограниченных контурами кондиционного состава ценных минеральных веществ, в том числе к месторождениям гидроинжекционного типа, или водозаборами пресных подземных вод на месторождениях 3–4-й групп сложности (трещинно-жильные, в ограниченных по площади массивах и структурах и др.). Гидравлический метод – мера вынужденная. Как известно, изучение геологического разреза и фильтрационных свойств горных пород выполняется по ограниченному числу горных выработок. Дефицит информации, крайняя неоднородность фильтрационных свойств горных пород, неясная роль (по крайней мере, на первых этапах изучения) граничных условий, гидравлическая связь водоносных горизонтов создают большие затруднения при расчетах и прогнозах развития ситуации. Применение более сложных методов (математического моделирования) для оценки запасов подземных вод на месторождениях 3–4-й групп сложности обеспечивает получение сугубо ориентировочных результатов, поскольку информационное обеспечение расчетов потребует больших финансовых затрат на буровые и опытно-фильтрационные работы, необходимые для обоснования граничных условий, изучения изменений фильтрационно-емкостных свойств пород и других факторов, используемых для построения модели, адекватной природным условиям. (При этом можно отметить, что для месторождений 3-й группы сложности математическое моделирование может применяться для получения крайних вариантов.) В связи с этим гидравлический метод остается практически единственным доступным методом оценки запасов в столь сложных условиях.

момент времени t ; S_0 – понижение уровня в рассматриваемой скважине от ее работы без учета взаимодействующих; $\sum S_j^{\nabla}$ – суммарная срезка под влиянием всех совместно работающих скважин (знак ∇ показывает, что из суммы исключается данная скважина); $\Delta S(t)$ – дополнительное понижение уровня, происходящее с течением времени под воздействием сработки запасов подземных вод (временная или дополнительная срезка).

Основные сложности при расчетах прогнозного понижения уровня связаны с оценкой характера развития временной срезки. Дело в том, что динамика ее развития зависит не только от неоднородности пласта, но и от характера граничных условий. Для изолированных в разрезе водоносных горизонтов известны четыре схемы, которыми можно описать любые краевые условия [1] (табл. 1).

Если граничные условия пласта известны, то, проследив динамику понижения уровня за период опытных работ, можно дать обоснованный прогноз развития дополнительной срезки уровня в перспективе, применяя в зависимости от граничных условий одну из перечисленных схем. Строго говоря, такой подход правильнее назвать комбинированным, поскольку временная срезка рассчи-

Таблица 1. Характеристика временной срезки в зависимости от граничных условий

Схема	Схема пласта, граничные условия	Характеристика временной срезки
1-я	Неограниченный пласт, полуограниченный пласт, пласт-квадрант с непроницаемыми границами	$\Delta S(t) = f(\lg(t))$
2-я	Пласт-полоса с двумя параллельными непроницаемыми границами	$\Delta S(t) = f(\sqrt{t})$
3-я	Пласт-круг с непроницаемым контуром (мульда)	$\Delta S(t) = f(t)$
4-я	Пласты с контуром постоянного напора	$\Delta S(t) = 0$

тывается все-таки гидродинамическим методом.

Ситуация существенно осложняется тем, что в условиях малой изученности или в сложных геологических условиях роль границ не всегда может быть установлена достоверно, а следовательно, и прогнозные оценки не могут быть обоснованы достаточно объективно. Кроме того, описанные закономерности справедливы для изолированных в разрезе пластов, что в большинстве случаев на практике не выдерживается. Водоупорные слои, разделяющие толщу горных пород на более или менее самостоятельные водоносные горизонты, в той или иной мере обеспечивают гидравлическую связь горизонтов. Если добавить еще и воздействие инфильтрационного питания, имеющего сезонную и трендовую составляющие, то прогнозирование динамики уровня становится весьма проблематичным.

Можно предложить общее решение, объединяющее все указанные схемы и учитывающее, в том числе, и гидравлическое взаимодействие пластов и инфильтрационное питание.

При условии $f_0 \geq 500$ ($f_0 = a^* t / r^2$, где a^* – пьезопроводность; r – радиус до точки наблюдения) в 1-й схеме логарифмическая функция может быть заменена степенной:

$$\lg(f_0) = \alpha \cdot (f_0)^\beta, \quad (2)$$

где α и β – некоторые эмпирические коэффициенты. При такой замене практически для всего диапазона реально встречаемых фильтрационных параметров и сроков прогнозирования среднеквадратическая погрешность составляет 3,9 %. То же самое можно сказать и об остальных схемах, с той лишь разницей, что коэффициенты степенной функции для них известны, а сама связь является функциональной с нулевой погрешностью*.

Понижения уровня при возмущении скважины с постоянным дебитом, например для 1-й схемы, описывается уравнением

$$S(t) = \frac{Q}{n \cdot km} \lg(f_0), \quad (3)$$

где n – коэффициент, определяемый краевыми условия-

ми пласта ($n = 4\pi$ – неограниченный пласт, $n = 2\pi$ – полуограниченный, $n = \pi$ – пласт-квадрант); km – водопроницаемость водоносного горизонта; Q – дебит откачки ($Q = \text{const}$).

Выражение (3) с учетом (2) можно представить следующим образом:

$$S(t) = \frac{Q}{n \cdot km} \alpha \cdot (f_0)^\beta. \quad (4)$$

Прологарифмировав обе части (4), получим:

$$\lg S(t) = \lg \frac{Q \alpha}{n \cdot km} + \beta \lg \left[\frac{2,25 a^*}{r^2} \right] + \beta \lg(t). \quad (5)$$

Объединив константы, выражение (5) можно записать в ином виде:

$$\lg[S(t)] = A + \beta \lg(t). \quad (6)$$

Гидравлический метод, как уже указывалось, предполагает, что в процессе опытных работ продолжительностью t_0 в заданном режиме водоотбора будет достигнуто некоторое понижение S_0 , которое фиксируется. Конечное понижение $S(t_k)$ рассчитывается исходя из характера развития временной срезки, т. е. в уравнении (1) первые два члена в правой части устанавливаются опытным путем непосредственными измерениями. Тогда из (6) можно получить:

$$\lg S(t_k) - \lg S(t_0) = \beta \lg(t_k) - \beta \lg(t_0),$$

откуда после преобразований

$$S(t_k) = S(t_0) \cdot \left[\frac{t_k}{t_0} \right]^\beta. \quad (7)$$

Эмпирический коэффициент β определяется из непосредственных наблюдений за динамикой развития понижения. Он равен угловому коэффициенту графика, построенного в координатах $\lg S(t) - \lg(t)$ по данным откачки. При этом характер граничных условий будет учтен этим же эмпирическим коэффициентом при условии, что продолжительность откачки достаточна, чтобы проявилось влияние границ. Из этих соображений требование нормативных документов, согласно которому устанавливается не менее чем годичный срок опытных работ, представляется вполне обоснованным.

В качестве примера ниже рассмотрена интерпретация опытно-фильтрационных работ по скважине, работающей в неограниченном пласте. Принятые в качестве фактических понижения уровня получены расчетным путем по формуле Тейса [1 – 3] (табл. 2). В расчетах использовались следующие данные: водопроницаемость $km = 80 \text{ м}^2/\text{сут}$; водоотдача $\mu^* = 0,0001$; параметр перетекания $b = 0$; расстояние до точки наблюдения $r = 10 \text{ м}$; дебит скважины принят постоянным – $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{сут}$. По данным табл. 2 построен вспомогательный график для определения эмпирического коэффициента β (рис. 1). Предполагается, что период опытных работ составлял чуть более одного

* Для природных условий пластовых, пластово-трещинных систем не существует функций с нулевой погрешностью. Даже детерминированные формулы выведены с определенной долей аппроксимации (замечание рецензента статьи В. И. Реутова).

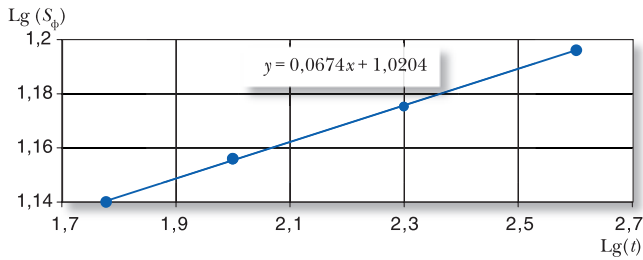


Рис. 1. Логарифмический график зависимости понижения уровня (м) от времени опытных работ (сут) для неограниченного пласта

года (400 сут), и оценка коэффициента проводилась только по данным этого периода. Полученное значение $\beta = 0,0674$.

Расчетное положение динамического уровня $S_{расч}$ определялось по формуле (7) начиная с момента времени $t = 60$ сут и соответствующего ему достигнутого понижения $S(t_0) = 13,8$ м: $S_{расч} = 13,8 (t/60)^{0,0674}$. Данные расчетов также сведены в табл. 2. Из сопоставления расчетных и фактических понижений видно, что максимальная погрешность δ в оценке уровня составляет около 3 %, что можно признать хорошим результатом.

Если опытно-фильтрационные работы выполнялись при нескольких ступенях откачки, то для получения общей временной характеристики целесообразно использовать известный прием перехода к удельному понижению и приведенному времени, т. е. вести построение графиков в координатах $lg(S/Q) - lg(t_{пр})$. Причем приведенное время может рассчитываться как общий отобранный объем воды с начала опытных работ, деленный на дебит соответствующей ступени.

К сожалению, описанная выше ситуация не самая распространенная в практике. В той или иной степени водупорные отложения являются проницаемыми и обеспечивают гидравлическую связь со смежными водоносными горизонтами, количественно характеризующуюся параметром перетекания b . Здесь возможно развитие процесса по двум вариантам.

Вариант 1. Формирование уровня происходит за счет вертикальных перетоков. Влияние границ пласта не сказывается на общем режиме.

Вариант 2. Гидравлическая связь с соседними горизонтами ослаблена, и на режим формирования понижения влияют как процесс перетекания, так и характер граничных условий.

В условиях гидравлической связи горизонтов динамика формирования понижения уровня для неограниченного в плане пласта описывается уравнением Тейса [2, 4], которое при квазистационарном режиме ($r^2/4a^*t \leq 0,1$) и $r/B \leq 0,2$ ($B = \sqrt{km/b}$) может быть представлено следующим образом [5]:

$$S = \frac{0,183}{km} Q \lg \left[\frac{2,25 a^* t}{r^2 (1 + 1,78 \frac{b}{\mu^* t})} \right], \quad (8)$$

где μ^* – водоотдача пласта, остальные обозначения прежние. Из (8) можно выразить радиус влияния скважин

$$R = 1,5 \sqrt{\frac{a^* x t}{(1 + 1,78 b t / \mu^*)}} = 1,5 \sqrt{\frac{km}{\mu^* / t + 1,78 b}} \cdot \quad (9)$$

При больших значениях t (9) переходит в хорошо известную формулу

$$R = 1,5 \sqrt{\frac{a^* x t}{(1 + 1,78 b t / \mu^*)}} = 1,12 \sqrt{\frac{km}{b}},$$

что предполагает развитие стационарного режима фильтрации. Если в пределах этого радиуса нет каких-либо границ, то пласт можно рассматривать как бесконечный с перетеканием. Обозначив $t_p = t(1 + 1,78 b t / \mu^*)$, через расчетное время получим решение, принципиально ничем не отличающееся от 1-й схемы (см. табл. 1), которое можно интерпретировать аналогично, заменив абсолютное время опыта на расчетное. В этом случае возникает необходимость в определении соотношения параметров b/μ^* , что можно выполнить, используя комбинацию методов подбора и временного прослеживания [5]. В то же время при более или менее значимых соотношениях параметров b/μ^* стационарный режим наступает довольно быстро, и схема, в соответствии с табл. 1, трансформируется в 4-ю ($\beta = 0$).

Таблица 2. Динамика понижения уровня в скважинах

Период	Время		Фактическое понижение		Расчетное понижение $S_{расч}$, м	Погрешность δ , %
	t , сут	$lg(t)$	S_{ϕ} , м	$lg(S_{\phi})$		
Опытно-фильтрационные работы	10	1,000	12,02	1,080	—	—
	20	1,301	12,71	1,104	—	—
	40	1,602	13,40	1,127	—	—
	60	1,778	13,80	1,140	13,80	0,00
	100	2,000	14,31	1,156	14,28	0,17
	200	2,301	14,99	1,176	14,97	0,20
	400	2,602	15,69	1,196	15,68	0,02
Прогнозируемый	1000	3,000	16,60	1,220	16,68	-0,52
	4000	3,602	17,97	1,255	18,32	-1,91
	6000	3,778	18,38	1,264	18,82	-2,44
	10000	4,000	18,88	1,276	19,48	-3,17

Если же ситуация развивается по второму варианту, то совместное воздействие границ и вертикальных перетоков может вызвать сложную деформацию логарифмических графиков и существенно затруднить диагностику опытных работ. Здесь можно предложить простое решение, в основе которого лежит принцип предельных случаев Нельсона–Скорнякова [6]. Суть его заключается в том, что при рассмотрении достаточно сложных задач отыскиваются решения, отвечающие предельным случаям, для которых искомая функция имеет наибольшее и наименьшее значения. Все промежуточные случаи располагаются между предельными. Из (8) следует, что при $b = 0$ зависимость полностью соответствует уже известной схеме неограниченного пласта, решение для которой имеется. При $b > 0$ формирование депрессионной воронки протекает не так активно, и логарифмические графики $\lg S(t) - \lg(t)$ будут носить затухающий характер с постоянно уменьшающимся коэффициентом, т. е. при доминирующем влиянии закрытых границ эмпирический коэффициент будет величиной постоянной; при преимущественном влиянии перетекания указанный коэффициент будет иметь тенденцию к уменьшению. Иначе говоря, если в расчетах коэффициента β использовать линейную экстраполяцию логарифмического графика по самой последней стадии опытных работ, то прогнозное понижение уровня окажется в известном диапазоне между достигнутым понижением $S(t_0)$ и расчетным, установленным по зависимости (7). Данный случай проиллюстрирован на рис. 2.

При таком подходе расчетные понижения будут всегда немного больше фактических, чем обеспечивается некоторый инженерный запас и в то же время достигается достаточно высокая точность расчетов.

В качестве примера можно привести результаты опытных работ по Березовскому участку Кисловодского

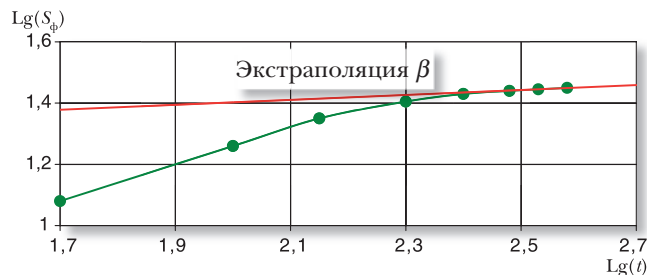


Рис. 2. Экстраполяция коэффициента β при наличии перетекания из смежных горизонтов

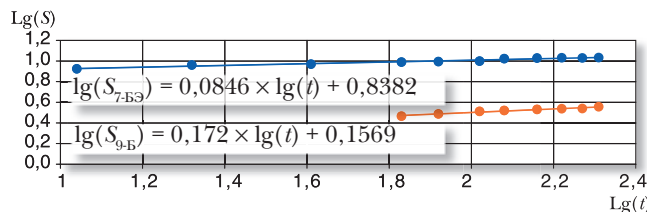


Рис. 3. Логарифмические графики зависимости понижения уровня (м) от времени опытных работ (сут) для скважин № 7-БЗ и № 9-Б

месторождения лечебных минеральных вод «нарзан». Водозаборная скважина № 7-РЭ эксплуатировалась в постоянном режиме с дебитом 250 м³/сут на протяжении 200 сут. Наблюдения за динамикой снижения уровня велись по двум наблюдательным скважинам – № 7-БЭ и № 9-Б, расположенным на удалении соответственно 12 и 150 м. Результаты наблюдений представлены в табл. 3.

По данным табл. 3 построены логарифмические графики (рис. 3), где линейной корреляцией по последнему участку наблюдений определены угловые коэффициенты: $\beta_{7-БЭ} = 0,0846$ и $\beta_{9-Б} = 0,172$. Прогнозное понижение рассчитывалось по эмпирическим формулам:

$$S_{7-БЭ} = 8,39 (t/10,88)^{0,846}; S_{9-Б} = 2,92 (t/66,92)^{0,172}.$$

Таблица 3. Результаты интерпретации опытных работ по Березовскому участку

Время опыта t , сут	$\lg(t)$	$\lg(S)$		Фактическое понижение, м		Расчетное понижение, м		
		Скв. № 7-БЭ	Скв. № 9-Б	Скв. № 7-БЭ	Скв. № 9-Б	Скв. № 7-БЭ	Скв. № 9-Б	
0,00				0	0			
10,88	1,04	0,924	0,037	8,39	1,09	8,39		
20,88	1,32	0,961	0,179	9,14	1,51	8,87		
40,88	1,61	0,969	0,336	9,32	2,17	9,38		
66,92	1,83	0,989	0,465	9,75	2,92	9,78	2,92	
82,92	1,92	0,994	0,487	9,86	3,07	9,96	3,03	
103,92	2,02	0,999	0,512	9,97	3,25	10,15	3,15	
120,92	2,08	1,022	0,520	10,52	3,31	10,29	3,23	
143,92	2,16	1,028	0,531	10,67	3,4	10,44	3,33	
164,92	2,22	1,031	0,537	10,73	3,44	10,56	3,41	
185,92	2,27	1,029	0,539	10,7	3,46	10,67	3,48	
201,92	2,31	1,033	0,556	10,78	3,6	10,74	3,53	
5000		Прогноз					14,09	6,13
10000		Прогноз					14,94	6,91

Результаты вычислений и прогнозная оценка понижения уровня на период 5000 и 10000 сут также сведены в табл. 3. Сопоставления цифрового материала за период наблюдений показывает, что погрешность расчетов не превышает 3 %.

Выводы

1. Предложенная формула, основанная на степенной зависимости понижения уровня от времени опытных работ, является чисто гидравлической. Граничные условия пласта учитываются эмпирическим коэффициентом β , который независимо от характера границ выражает линейную связь между логарифмом времени и логарифмом понижения.

2. При наличии перетекания возможно развитие динамики понижения по двум схемам. В первом случае — при относительно больших параметрах перетекания — схема имеет те же закономерности, что и схема для пластов с контуром постоянного напора. В противном случае

совместное воздействие границ и вертикальных переток может вызвать сложную деформацию логарифмических графиков и затруднить диагностику опытных данных.

3. При прогнозировании уровня на длительную перспективу рекомендуется экстраполировать эмпирический коэффициент по линейному закону, используя самые последние этапы опытных работ, общая продолжительность которых должна быть не менее года. При таком подходе расчетные понижения будут несколько больше фактических, чем обеспечивается некоторый инженерный запас и в то же время достигается достаточно высокая точность расчетов.

4. Гидравлические методы целесообразно применять в сложных гидрогеологических условиях при подсчете эксплуатационных запасов одиночных скважин или небольших компактных групп скважин, где применение более сложных методов нецелесообразно или невозможно по каким-либо причинам. ■■■



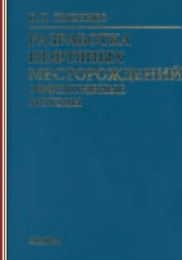
Список литературы = References

1. Боцевер Ф. М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1968. = *Bochever F. M. The theory and practical methods of hydrogeological assessment of useful reserves of underground waters. M.: Nedra Publishers, 1968 (in Russian).*
2. Боревский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1973. = *Borevsky B. V., Samsonov B. G., Yazvin L. S. Methods and procedures for the assessment of the parameters of aquifers by results of pumping tests. M.: Nedra Publishers, 1973 (in Russian).*
3. Гавич И. К. Гидрогеодинамика. М.: Недра, 1988. = *Gavich I. K. Hydrogeodynamics. M.: Nedra Publishers, 1988 (in Russian).*
4. Гидрогеологические расчеты на ЭВМ: Учебное пособие / Под редакцией Р. С. Штенгелова. М.: МГУ, 1994. = *Computer-aided hydrogeological design: student's manual / under the editorship of R. S. Shtengelov: M.: MSU, 1994 (in Russian).*
5. Малков А. В. Определение гидродинамических параметров водоносных горизонтов в условиях перетекания // Известия вузов. Геология и разведка. 2007. № 1. С. 31–34. = *Malkov A. V. Determination of hydrodynamic parameters of aquifers in the conditions of overrunning // Izvestiya Vuzov. Geologiya i razvedka. 2007. № 1. P. 31–34 (in Russian).*
6. Справочное руководство гидрогеолога / Под редакцией В. М. Максимова. М.: Недра, 1967. Т. 1. = *Manual for Hydrogeologists / under the editorship of V. M. Maksimov. M.: Nedra Publishers, 1967. V. 1 (in Russian).*

Technique and procedures for underground water reserve estimation by hydraulic method A. V. Malkov

In complicated hydrogeological conditions for the estimation of underground water reserves use is made of a hydraulic method based on the results of actual observation of the drawdown variation and on the forecasts of the drawdown behaviour governed by certain objective laws. The authors present a standard technique, which takes into account the nature of marginal conditions and hydraulic connection of aquifers. The technique was successfully tested at the Kislovodsk reservoir of therapeutic mineral waters. Application area: single wells or small groups of wells drilled in complicated hydrogeological conditions.

Key words: hydraulic method, useful resources, underground waters, drawdown, reservoir marginal conditions, test filtration processes.



НА КНИЖНУЮ ПОЛКУ НЕДРОПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Лысенко В. Д. Разработка нефтяных месторождений. Эффективные методы. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2009. 552 с., илл.

Отражены вопросы проектирования и результаты анализа разработки нефтяных месторождений. Приведена аналитическая методика проектирования разработки нефтяных месторождений, представляющая собой аналитическое решение прямой и обратной задач проектирования разработки залежи; отличается мобильностью и учетом всех существенных параметров и действующих факторов.

Главное внимание уделено радикальному увеличению текущей добычи нефти и конечной нефтеотдачи пластов за счет повышения качества контроля работы и регулярных гидродинамических исследований скважин и на этой основе повышения эффективности управления процессом разработки, а также за счет применения высокоэффективных технологий извлечения нефти из недр. Для специалистов по разработке нефтяных месторождений, занятых проектированием, осуществлением и совершенствованием процесса разработки, а также студентов вузов по специальности «Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений».