

УДК [(556.3.681.3):(556.38:631.67)](477.72+477.75)

## О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОДТОКА СОЛЕННЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПРИСИВАШЬЕ

*Ю. С. Бут, В. И. Лялько, Г. А. Шнейдерман*

В засушливых районах Украинской ССР, с севера и юга примыкающих к Сивашу, подземные воды являются основным источником питьевого водоснабжения, а в восточной части территории, куда еще не доведена распределительная сеть Каховской и Северо-Крымской оросительных систем, они широко используются для орошения сельскохозяйственных угодий.

Основным источником пресных подземных вод здесь является водоносный комплекс, содержащийся преимущественно в известняках средне- и верхнесарматского, мэотического и понтического возраста мощностью до 100 м, залегающий на глубине 80—100 м.

Минерализация вод этого комплекса на востоке территории колеблется от 0,3 до 1,4 г/л (гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридный кальциево-натриевый состав), а на некотором расстоянии к западу от Чонгарского п-ова увеличивается до 5—14 г/л (хлоридный магниевый-кальциево-натриевый состав). Это может быть связано с переливом соленых вод из вышележащего плиоценового водоносного комплекса в местах отсутствия выдержанных водоупорных пород в его подошве.

Указанная особенность создает угрозу засоления пресных подземных вод при их интенсивной эксплуатации, которая, в частности, развивается в пределах Чонгарского п-ова.

Поэтому в настоящей работе было решено исследовать динамику подземных вод понт-мэотис-сарматского водоносного комплекса Присивашья в ненарушенных условиях и дать прогноз изменения этой динамики и сроков подтягивания соленых вод к водозаборам на примере наиболее типичного и крупного водозабора, расположенного в пределах Чонгарского п-ова.

Гидродинамические условия водоносного комплекса сарматских, мэотических и понтических известняков в пределах Присивашья определяются взаимодействием подземных потоков, поступающих с Причерноморской впадины (с севера) и с Крымского п-ова (с юга) и направляющихся в сторону Черного и Азовского морей. Гидродинамическая сетка (рис. 1) составлена для естественных условий, которые имели место до начала эксплуатации комплекса, т. е. до 1891 г.

Исследованиями, проведенными на участке междуречья Днепр—Молочная, прилегающему с севера к рассматриваемой территории, установлено, что напоры подземных вод водоносного комплекса неогеновых известняков в ненарушенных эксплуатацией условиях были выше напоров водоносного комплекса киммерийских и куяльницких песков [9]. Это явление могло быть обусловлено более высоким гипсометрическим положением областей питания подземных потоков в неогеновых известняках при сравнительно слабой разгрузке водоносного комплекса в естественных условиях. Таким образом, имеются благоприятные предпосылки для восходящего просачивания подземных вод понтических, мэотических и сарматских отложений.

С целью более детального анализа гидродинамических условий и взаимокорректировки основных фильтрационных параметров водоносного комплекса неогеновых известняков Присивашья были проведены расчеты по методу распределенного баланса [9,13—15]. Результаты их показали, что на большей части исследуемой территории преобладает отрицательный баланс площадного распределенного питания (рис. 2). При достаточно мощном подстилающем водоупоре это говорит о восходящем

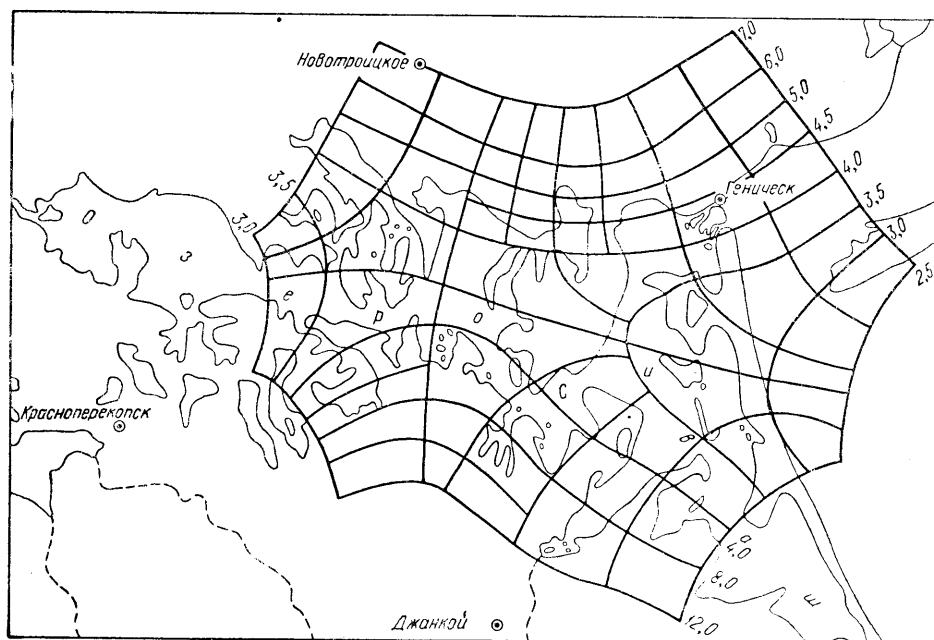


Рис. 1. Гидродинамическая сетка водоносного комплекса понтических, мэотических и верхнесарматских отложений Присивашья в естественных условиях (пьезометрические уровни в м).

перетекании подземных вод в вышележащий водоносный горизонт, что подтверждается и распределением напоров в горизонтах неогеновых отложений по вертикали.

Наибольшие значения отрицательных перетеканий (до  $5,0 \text{ мм/год}$ ) получены для района Арабатской Стрелки, еще более высокая величина перетекания (до  $10,0 \text{ мм/год}$ ) характерна для восточной части исследуемой площади, расположенной уже в пределах акватории Азовского моря. Северо-восточнее г. Геническ баланс перетекания достигает нулевых значений, а на северо-западе Присивашья составляет  $3,0 \text{ мм/год}$ . В юго-западной части образуется обширная зона с нулевым балансом питания, которая длинной полосой субширотного направления тянется на восток. Южнее крымского побережья Сиваша напоры в вышележащих водоносных горизонтах киммерийских и куяльницких отложений увеличиваются; здесь преобладает поступление воды в водоносный комплекс известняков неогена, достигающее  $0,7 \text{ м.м./год}$ .

Водоснабжение колхоза «Грузия», расположенного на Чонгарском п-ове, в 1968 г. осуществлялось из 46 скважин глубиной 85—117 м. Общий фактический отбор воды в осенне-зимний период составляет  $1100 \text{ м}^3/\text{сутки}$ , в весенне-летний — около  $1300 \text{ м}^3/\text{сутки}$ . В настоящее время в колхозе орошается  $950 \text{ га}$  земель. До 1975 г. площадь орошаемых участков возрастет. С этой целью в 1969 г. пробурено шесть новых эксплуатационных скважин. В Джанкойском районе в 1968 г. также

пробурены скважины для использования вод в целях водоснабжения и орошения.

Под влиянием водоотбора из водоносного комплекса понтических, мэотических и сарматских известняков началось снижение пьезометрических уровней до уровня ниже напоров в комплексе отложений среднего и верхнего плиоцена, которое приводит на участках с плохой изоляцией

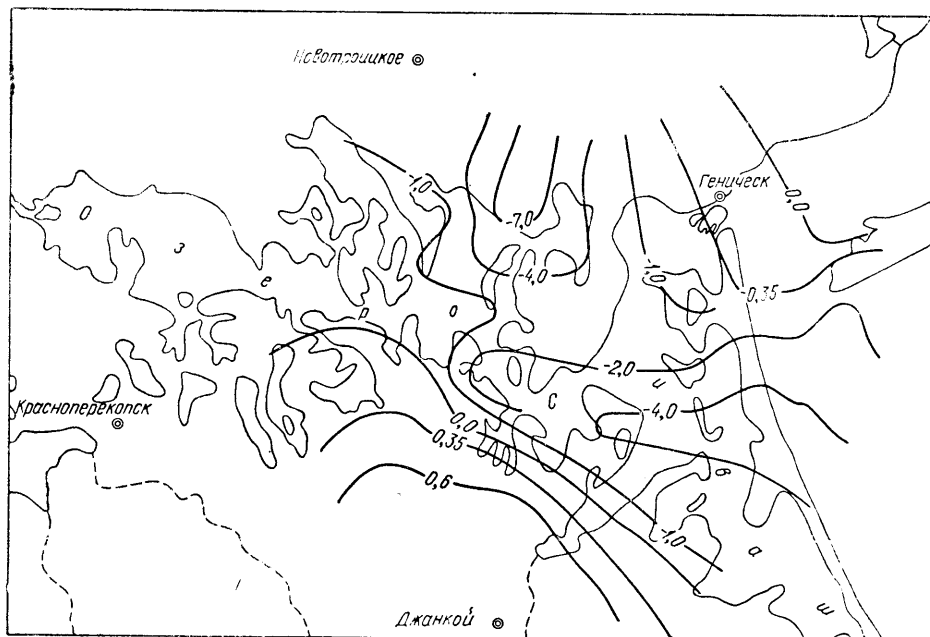


Рис. 2. Карта изолиний откорректированного баланса питания водоносного комплекса понтических, мэотических и верхнесарматских отложений Присивашья (в мм год).

к местному подпитыванию водами киммерийских и куяльницких отложений и увеличению общей минерализации воды. Например, за период эксплуатации скв. 12 на о. Куяк-Тук, расположенном в западной части Чонгарского п-ова, минерализация подземных вод увеличилась с 1,3 до 12,9—13,8 г/л, т. е. достигла минерализации воды Сиваша.

О существовании относительно водоупорных слоев между водоносными комплексами киммерий-куяльницких и понтических, мэотических, сарматских отложений говорит устойчивое различие химического состава вод этих комплексов. Нисходящим просачиванием из среднеплиоценовых пород можно объяснить наличие соленоватых вод в понтических известняках (при пресных водах в мэотических и сарматских отложениях) в районе станций Партизаны и Новоалексеевка, к северу от Чонгарского п-ова. В некоторых скважинах (23 и 36) при интенсивном отборе зарегистрировано быстрое уменьшение минерализации вод до их полного распреснения. Это можно объяснить тем, что расход скважины превышает количество воды, перетекающее из среднеплиоценовых отложений. Таким образом, здесь преобладает подтягивание пресных вод из окрестных участков водоносного комплекса.

Водопроводимости комплекса понтических, мэотических и сарматских известняков, рассчитанные по имеющимся скважинам и уточненные с помощью метода распределенного баланса, изменяются в северных районах Присивашья в среднем от 3600 м<sup>2</sup>/сутки на западе до 2100 м<sup>2</sup>/сутки в центральной части и 700—1000 м<sup>2</sup>/сутки — на востоке (рис. 3). Повышение водопроводимости наблюдается в районе Арабатской Стрелки и прилегающей акватории Азовского моря; здесь они превышают 4000 м<sup>2</sup>/сутки.

В центральных районах Присивашья скорость движения воды в водоносном комплексе резко падает. Приблизительно в 10 км западнее Чонгарского п-ова находится «песовый» участок, образовавшийся в результате отклонения встречающихся подземных потоков на запад и восток (см. рис. 1). В пределах Чонгарского п-ова водопроницаемости водоносного комплекса неогеновых известняков, рассчитанные с помощью взаимокорректировки и усредненные по ячейкам гидродинамической сетки, равны 612—2078 м<sup>2</sup>/сутки (в среднем около 2000 м<sup>2</sup>/сутки). Южные

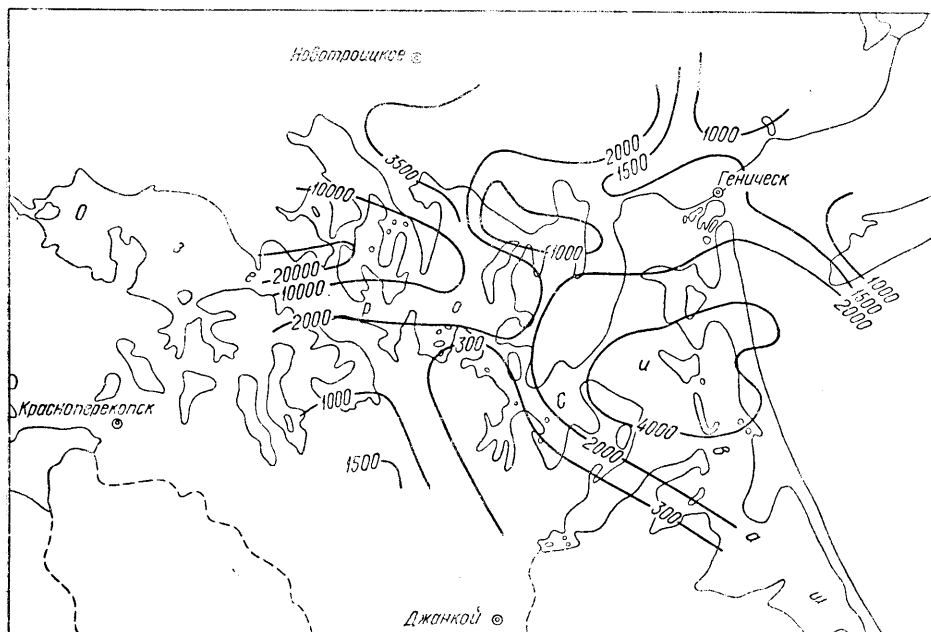


Рис. 3. Карта откорректированных водопроницаемостей водоносного комплекса понтических, мэотических и верхнесарматских отложений Присивашья (в м<sup>2</sup>/сутки).

районы Присивашья характеризуются уменьшением водопроницаемостей: они составляют на западе в среднем 1200 м<sup>2</sup>/сутки, в центральной части — 400 м<sup>2</sup>/сутки, на востоке — 340 м<sup>2</sup>/сутки.

Указанные особенности динамики подземных вод понтических, мэотических и сарматских отложений и прогнозирование подтока соленых вод при эксплуатации водоносного комплекса системой одиночных скважин и групповых водозаборов определили выбор схемы гидрогеологических условий, положенных в основу расчетов на электроинтеграторе УСМ-1.

На севере и юге фильтрационной модели рассматриваемого водоносного комплекса были заданы граничные условия III рода, т. е. расход подземных потоков в бытовых условиях по контурам модели, отнесенный через дополнительные фильтрационные сопротивления к неизменным уровням пьезометрической поверхности. На западе и востоке фильтрационной модели, где осуществляется региональная разгрузка подземных вод в прибрежных частях Черного и Азовского морей, были заданы граничные условия I рода (постоянный напор 3 м над уровнем моря). На отдельных небольших участках, соединяющих по периферии фильтрационной модели области внешнего питания и разгрузки (на юго-западе и юго-востоке, северо-западе и северо-востоке), были заданы граничные условия II рода (непроницаемый контур по линиям тока бытового подземного потока).

Фильтрационная неоднородность водоносного комплекса и характер распределения значений баланса воды в нем (в бытовых условиях) ко-

личественно определялись для каждой из 68 ячеек гидродинамической сетки. Для расчетов область была разбита ортогональной сеткой на 557 расчетных узлов, для каждого из которых были выписаны средние значения напоров, водопроницаемостей и упругоёмкостей, а также была нанесена граница раздела соленых и пресных вод.

Изменение гидродинамических условий влечет за собой перестройку фильтрационной сетки. Условия эксплуатации водоносного комплекса понтических, мэтических и сарматских известняков на Чонгарском п-ове должны сдвинуть «плесовый» участок в сторону водозаборов. Другим следствием эксплуатации может явиться подтягивание соленых вод из киммерийских и куюльницких отложений.

При моделировании продвижения границы раздела вод различных плотностей часто применяется поршневая схема вытеснения, при которой контакт считается резким, т. е. каждая точка границы раздела движется под действием только горизонтальной составляющей скорости. Это допущение приводит к некоторому завышению скорости перемещения выбранной изолинии минерализации, что дает определенную гарантию безопасности при расчетах подтока соленых вод.

В задачах поршневого вытеснения одной жидкостью другой скорости перемещения границы раздела зависят от расположения внутренних и внешних границ области фильтрации и параметров фильтрационного поля. Скорости перемещения границы двух жидкостей определяются через скорости фильтрации в точках, находящихся на линии контакта.

На электрической модели в каждый момент времени в любой точке имеются значения напряжений, отвечающие закону распределения напоров водоносного пласта. Токи, протекающие через элементы электрической модели, будут пропорциональны расходам через соответствующие элементы водоносного горизонта. Эти соотношения и положены в основу методики исследования перемещения контакта жидкостей [2, 12].

Для элементарной трубки тока скорость  $v$  в сечении  $F$  равна

$$v = \frac{Q}{F}, \quad (1)$$

где  $Q$  — расход жидкости.

Коэффициенты пропорциональности между напряжением и напором  $n_H$ , между токами и расходами  $n_Q$ , между электрическим сопротивлением сетки и фильтрационным сопротивлением  $n_R$  соответственно равны

$$n_H = \frac{U}{H}, \quad n_Q = \frac{I}{Q}, \quad n_R = \frac{R}{R_\Phi}, \quad (2)$$

где  $U$  — электрический потенциал,  $H$  — напор фильтрационного потока,  $I$  — сила тока,  $Q$  — фильтрационный расход,  $R$  — электрическое сопротивление,  $R_\Phi$  — фильтрационное сопротивление.

Через электрические величины фильтрационный расход запишется так:

$$Q = \frac{\Delta U}{R} \cdot \frac{n_R}{n_H}, \quad (3)$$

где  $\Delta U$  — падение напряжения на сопротивлении  $R$ .

С учетом (2) это сопротивление равно

$$R = \frac{l}{F} \cdot \frac{\mu}{K_\Pi} m_0 n_R, \quad (4)$$

где  $l$  — расстояние по оси трубки тока, на котором замерен перепад напряжения  $\Delta U$ ,  $F$  — среднее (по  $l$ ) сечение трубки тока,  $\mu$  — вязкость

фильтрующей жидкости,  $m_0$  — коэффициент эффективной пористости,  $K_{\Pi}$  — коэффициент проницаемости пласта, равный

$$K_{\Pi} = \frac{k_{\phi}^{\mu}}{\gamma}, \quad (5)$$

где  $K_{\phi}$  — коэффициент фильтрации,  $\gamma$  — удельный вес жидкости.

Подставив (3) и (4) в (5), получим

$$v = \frac{\Delta U K_{\Pi}}{n_H l m_0 \mu}. \quad (6)$$

При использовании метода «разноцветных» жидкостей, условно принимающем одножидкостную систему, линии тока и потенциальное поле при перемещении контакта двух жидкостей остаются неизменными. По направлению линий тока гидродинамической сетки замеряются величины градиентов  $\Delta H$  на определенном произвольно выбранном  $l$ , затем по формуле (6) определяются скорости  $v$ .

Задавая шаг по времени  $\Delta T$  и допуская, что скорость в этом интервале времени постоянная, находим путь продвижения точки контакта по каждой линии тока:

$$l = v \Delta T.$$

Величина шага времени принимается в зависимости от сложности конкретной задачи и желаемой точности решения. С уменьшением  $\Delta T$  точность решения увеличивается.

Подключение источников тока к узлу сетки, в котором моделируется водозабор, производится через дополнительное сопротивление  $R_{\pi}$ , так как масштаб моделирования не позволяет непосредственно учесть радиус скважины [8]

$$R_{\pi} = \frac{R_0}{2\pi} \ln \frac{0,2l}{r_{\text{скв}}}, \quad (7)$$

где  $R_0$  — среднее из четырех сопротивлений, примыкающих к узлу со скважиной,  $l$  — среднее из четырех расстояний от этого узла до соседних,  $r_{\text{скв}}$  — радиус скважины.

Скорость и время перемещения фронта вод различной минерализации могут быть вычислены из основного уравнения движения подземных вод

$$\frac{d^2 H}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH}{dr} = 0. \quad (8)$$

Приняв  $r_2 > r_1$  (рис. 4), при  $r=r_1$  получим  $H=H_1$ , а при  $r=r_2$  получим  $H=H_2$ . Величина напора на пути движения границы раздела вод различных минерализаций равна

$$H = H_1 + (H_2 - H_1) \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (9)$$

Скорость перемещения контакта в этих условиях с учетом эффективной пористости  $m_0$  запишется следующим образом:

$$v = -\frac{1}{m_0} K \frac{dH}{dr} = -\frac{K}{m_0} \cdot \frac{H_2 - H_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{1}{r}. \quad (10)$$

Время перемещения границы раздела по элементарному отрезку  $dr$  равно

$$dt = \frac{dr}{v} = \frac{r dr}{\frac{K}{m_0} \cdot \frac{H_2 - H_1}{1n \frac{r_2}{r_1}}}, \quad (11)$$

а время перемещения контакта от  $r_2$  до  $r_1$  составит

$$t = \int_{r_3}^{r_4} \frac{dr}{v} = \frac{m_0}{K} \cdot \frac{1n \frac{r_2}{r_1}}{H_2 - H_1} = \int_{r_3}^{r_4} r dr = \frac{m_0}{2K} \cdot \frac{1n \frac{r_2}{r_1}}{H_2 - H_1} (r_4^2 - r_3^2). \quad (12)$$

Если же необходимо определить точку нахождения фронта вод различных минерализаций в определенный момент времени  $t$ , то уравнение можно записать так:

$$r_3 = \sqrt{r_4^2 - \frac{2K}{m_0} \cdot \frac{H_2 - H_1}{1n \frac{r_2}{r_1}} t}. \quad (13)$$

С учетом расположения существующих и проектируемых оросительных участков, населенных пунктов, мест водопоя скота и тому подобное для расчета эксплуатационных запасов подземных вод Чонгарского п-ова было принято 15 групповых водозаборов. Количество скважин, которое будет пробурено и оборудовано в пределах каждого водозабора, колеблется от 2 до 7, составляя в сумме 54 скважины.

При моделировании использовался известный метод суперпозиции, позволяющий не задавать на модели распределенное питание, имевшее место в начальных (стационарных) условиях. Согласно этому методу моделируется изменение пьезометрических напоров под влиянием

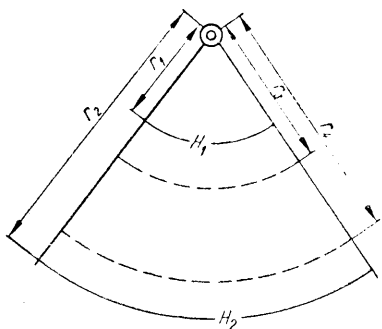


Рис. 4. Расчетная схема перемещения контакта вод различной минерализации.

эксплуатационного водоотбора. Полученные значения напоров алгебраически складываются по ординатам в каждом узле сетки с соответствующими бытовыми напорами. Затем с помощью интерполяции строится карта изолиний прогнозных пьезометрических напоров.

Граница вод повышенной минерализации (2 г/л в начальных условиях проходит от водозаборов I и II (рис. 5) на расстоянии 1325 м. Проведенное моделирование показало, что время, необходимое для установления стационарной картины, практически мало по отношению к длительности подтягивания соленых вод за весь период эксплуатации каптажных сооружений. Это обстоятельство, подтверждаемое и последующими аналитическими расчетами, позволило воспользоваться уравнениями стационарной фильтрации для расчета перемещения изолинии минерализации 2 г/л в сторону указанных водозаборов по линиям тока. Поскольку в стационарных условиях градиенты уклонов пьезометрической поверхности в сторону водозаборов должны давать несколько за-

вышенные значения скоростей подтягивания минерализованных вод, это гарантирует определенную страховку в результатах расчетов (см. таблицу).

Выполненный расчет скорости перемещения фронта вод повышенной минерализации под влиянием эксплуатационного водоотбора в направлении с запада на восток (от о. Куюк-Тук к ближайшему водозабору I) показал, что нет оснований опасаться увеличения минерализации

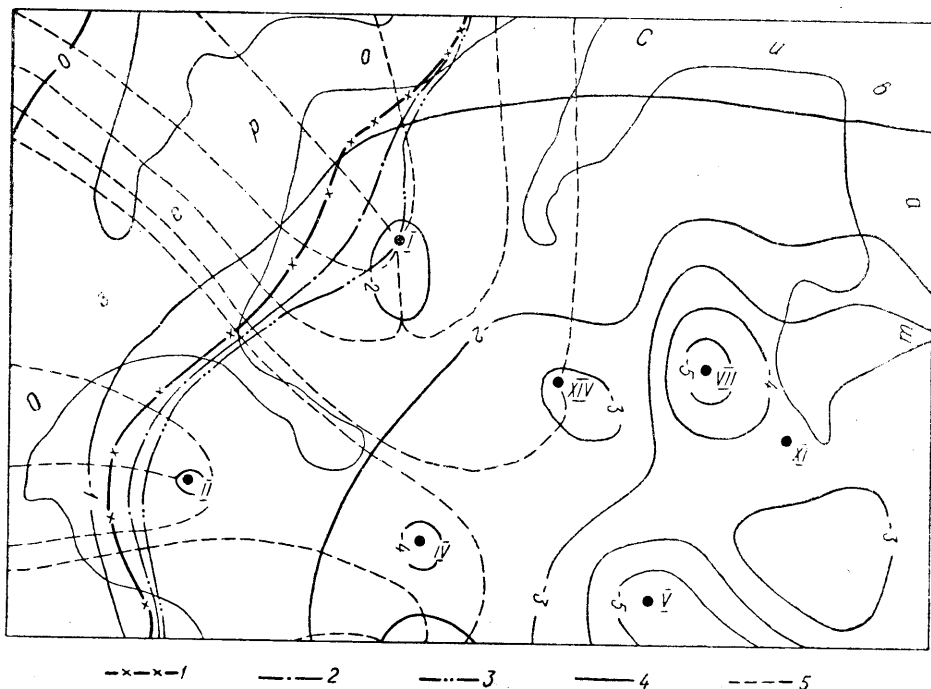


Рис. 5. Прогнозная гидродинамическая сетка водоносного комплекса понтических, мэотических и верхнесарматских отложений в условиях установившейся фильтрации к групповым водозаборам.

1 — изолиния минерализации воды 2 г/л в ненарушенных условиях; 2 — изолиния минерализации воды 2 г/л через 30 лет работы эксплуатационных водозаборов; 3 — изолиния минерализации воды 2 г/л через 45 лет; 4 — пьезогидроизогипсы; 5 — линии тока.

отбираемых скважинами вод на протяжении ближайших 45 лет. Это значит, что примерно до 2015 г. можно использовать подземные воды, содержащиеся в известняках понтического, мэотического и сарматского возраста для орошения, питьевого и хозяйственного водоснабжения в количестве 30 тыс. м<sup>3</sup>/сутки с минерализацией, не превышающей 2 г/л. Для устранения засоления водоносного комплекса в этих отложениях после 2015 г. в районе водозабора I и после 2026 г. в районе водозабора

**Динамика перемещения фронта подземных вод повышенной минерализации (2 г/л) при работе эксплуатационных водозаборов I и II по кратчайшим линиям тока, направленным к этим водозаборам**

Номер водозабора	Начальное расстояние от водозабора, м	Изменение расстояния по годам, начиная с момента пуска водозабора, м					Время (годы), через которое изолиния минерализации 2 г/л достигнет водозабора
		10 лет	20 лет	30 лет	35 лет	40 лет	
I	1325	1170	995	755	610	400	45
II	1330	1210	1080	930	850	755	50



II целесообразно прекратить отбор воды, соответственно увеличив его на восточных участках Чонгарского п-ова.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что если в типовых гидрогеологических условиях понт-мэотис-сарматского водоносного комплекса Присивашья фронт соленых вод располагается на расстоянии не ближе 1 км от водозабора, то срок безопасной (от засоления) эксплуатации такого водозабора может оцениваться около 20—25 лет.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бабинец А. Е. Подземные воды юго-запада Русской платформы. Изд. АН УССР, К., 1961.
2. Белаш П. М. Основы вычислительной техники. «Недра», М., 1964.
3. Бондарчук В. Г. Геология Украины. Вид. АН УРСР, К., 1959.
4. Бут Ю. С. и др.— В сб.: Охрана подземных вод Украинской ССР от загрязнения и истощения, 1. «Наукова думка», К., 1970.
5. Гидрогеология СССР, 8. Крым. «Недра», М., 1970.
6. Гордиевич В. А. и др. Гидрогеология Крыма и перспективы нефтеносности. Изд. АН УССР, К., 1963.
7. Каменский Г. Н., Толстихина М. М., Толстихин Н. И. Гидрогеология СССР. Госгеолтехиздат, М., 1959.
8. Крылов А. П. и др. Проектирование разработки нефтяных месторождений. Гос-топтехиздат, М., 1962.
9. Лялько В. И., Шнейдерман Г. А. Формирование и прогноз ресурсов подземных вод засушливых районов. Изд. АН УССР, К., 1965.
10. Молявко Г. И.— В кн.: Геология СССР, 5. Украинская ССР, Молдавская ССР, 1. Госгеолтехиздат, М., 1958.
11. Романовский Г. Д.— Горн. журн., 1871, 10.
12. Чарный И. А. Подземная гидрогазодинамика. Гос-топтехиздат, М., 1963.
13. Шнейдерман Г. А.— ДАН УРСР, 1963, 7.
14. Шнейдерман Г. А.— В сб.: Материалы 6-го коорд. совещ. по фильтрации. Изд. ВНИИГ, Л., 1964.
15. Шнейдерман Г. А.— В сб.: Проблемы гидрогеологии и инженерного грунтоведения. «Наукова думка», К., 1970.

Институт геологических наук  
АН УССР

Статья поступила  
31.V 1973 г.