

оружений на крупномасштабных моделях. — В сб.: Научные исследования по гидротехнике в 1970 г. Л., 1971. 5. Левкевич Е.М., Юхновец В.Н. Исследование фильтрации в напорной дамбе с водопроницаемым креплением верхового откоса при волнении в верхнем бьефе. — В сб.: Научные исследования по гидротехнике в 1970 г. Л., 1971. 6. Красножон Г.Ф. Накат волн на откосы. — В сб.: Теория волн и расчет гидротехнических сооружений. М., 1975. 7. Барекян А.Ш., Челышев А.К. Исследование водопроницаемости стенок трубофильтров из крупнопористого бетона. — Тр. Калинин. политехн. ин-та, 1971, вып. 11(24).

УДК 556.332.63

В.С. Усенко, М.Ю. Калинин

### ИССЛЕДОВАНИЕ И УЧЕТ СЕЗОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ПРОГНОЗЕ РЕЖИМА РАБОТЫ БЕРЕГОВОГО ВОДОЗАБОРА

Одним из важнейших факторов, определяющих производительность водозаборов, расположенных в речных долинах, является наличие и характер связи между поверхностными и подземными водами. Поэтому при оценке эксплуатационных запасов подземных вод этому вопросу должно уделяться большое внимание. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод при гидрогеологическом обосновании искусственного восполнения может производиться с использованием балансового, гидродинамического методов, а также по методу аналогий.

Обычно при прогнозировании производительности водозабора на длительный срок эксплуатации уровень воды в реке, как правило, принимают постоянным и приуроченным к периоду летней или зимней межени. Степень гидравлической взаимосвязи, обусловленную сопротивлением и неоднородностью русловых отложений, несовершенством вреза реки в водоносный горизонт, наличием слабопроницаемого слоя, полагают также постоянной. Эти допущения при расчетах производительности береговых водозаборов дают определенный "запас надежности" и для некоторых случаев их можно считать вполне приемлемыми.

Для более точного прогнозирования режима подземных вод при работе водозаборов с искусственным восполнением, рас-

положенных в долинах рек, необходимо знать динамику взаимосвязи подземных и поверхностных вод в течение всего года.

Зная ход уровня в реке в годовом разрезе и изменения величины  $\Delta L$ , характеризующей условия связи поверхностных и подземных вод, мутности речной воды и скорости инфильтрации из бассейнов, можно дать прогноз режима работы инфильтрационных сооружений (установить длительность фильтроциклов и время чисток для инфильтрационных бассейнов, каналов и т.д.).

В качестве величины, которая характеризует степень взаимосвязи подземных и поверхностных вод, обычно принимается дополнительное фильтрационное сопротивление ложа речных русел [1...5].

В настоящее время существуют различные методики для определения фильтрационного сопротивления русловых отложений [4,5,8].

С целью оценки эксплуатационных запасов подземных вод на опытном водозаборе с искусственным восполнением, расположенном в долине Днепра, в течение 1973--1975 гг. изучались условия взаимосвязи подземных и поверхностных вод. Для этого велись круглогодичные наблюдения за режимом речных и грунтовых вод, определялся литологический состав отложений русла, делались промеры русла и проводились опытные кустовые откачки.

С целью получения более достоверных данных об условиях взаимосвязи результаты полевых наблюдений и исследований были обработаны с помощью аналитических методов и моделированием на аналоговых машинах.

Эти методы были разделены на четыре группы: 1-я группа -- методы, основанные на теоретических зависимостях, не требующие режимных наблюдений и опытных откачек; 2-я -- методы, основанные на использовании данных режимных наблюдений; 3-я -- методы, основанные на результатах кустовых откачек; 4-я -- методы моделирования.

1. При несложных схемах строения ложа реки для определения величины ее гидродинамического несовершенства используется следующая аналитическая зависимость [3]:

$$\Delta L = \sqrt{k m A_o} \operatorname{cth} \frac{2b}{\sqrt{k m A_o}}, \quad (1)$$

где  $A_o = \frac{m_o}{k_o}$  обобщенный параметр, названный В.М. Гри-

горьевым [3] коэффициентом сопротивления заиленного слоя фильтрации;  $k_o, m_o$  -- коэффициент фильтрации и мощность этого слоя;  $k, m_o$  -- коэффициент фильтрации и мощность русловых отложений;  $2b$  -- ширина реки.

2а. Для установившегося движения в условиях естественного режима, согласно В.М. Шестакову [8], величина несовершенства реки (водоема) определяется из выражения

$$\Delta L = \frac{H_1 - H_p}{H_2 - H_1} (x_2 - x_1) - x_1, \quad (2)$$

где  $H_p, H_1, H_2$  -- отметки уровней воды в реке, в первой (ближайшей к реке) и во второй наблюдательных скважинах;  $x_1, x_2$  -- расстояние от береговой линии до первой и второй наблюдательных скважин.

2б. Известно, что в период паводка изменения уровней воды в реке ( $\Delta H_p$ ) и в расположенной вблизи уреза наблюдательной скважине ( $\Delta H$ ) связаны зависимостью

$$\frac{\Delta H}{\Delta H_p} = 1 - e^{-\tau^2} \operatorname{erfc} \tau. \quad (3)$$

В.М. Шестаков [8] предлагает для определения величины гидродинамического несовершенства ложа реки на период паводков следующее выражение

$$\Delta L = \frac{\sqrt{at}}{\tau} - x_1, \quad (4)$$

где  $x_1$  -- расстояние от реки до наблюдательной скважины;  $t$  -- время, отсчитываемое от начала заметного подъема или спада уровня воды в реке;  $a$  -- коэффициент уровнепроводности;  $\tau$  -- параметр, определяемый по специальным таблицам.

3а. Используя данные кустовых опытных откачек, величину  $\Delta L$  определяли по приближенным формулам

$$\alpha = \frac{\lg \frac{2l - b_1}{b_1}}{\lg \frac{2l - b_2}{b_2}}, \quad (5)$$

где  $b_{1,2}$  -- расстояние соответствующих наблюдательных скважин до опытных;  $l$  -- переменное значение расстояния от опытной скважины до реки. Зная фактически полученную при

откачке величину  $\alpha = \frac{S_1}{S_2}$ , графическим путем можно найти искомое значение  $l_p$ . Тогда дополнительное сопротивление ложа реки определится из выражения

$$\Delta L = l_p - l. \quad (6)$$

36. Преобразуя формулу, широко применяемую при оценке запасов подземных вод [3]

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{2(1+\Delta L) - r_1}{r_1}, \quad (7)$$

получим выражение для

$$\Delta L = \frac{r_1 \left( e^{\frac{2\pi km S}{Q}} + 1 \right) - 2l}{2}, \quad (8)$$

где  $r_1$  — расстояние между наблюдательной скважиной, по которой определяется  $\Delta L$ , и опытной;  $S$  — понижение уровня грунтовых вод в наблюдательной скважине;  $Q$  — расход воды, получаемый из опытной скважины;  $km$  — водопроницаемость пласта;  $l$  — расстояние между рекой и опытной скважиной.

4. Исследования на электрических моделях, проведенные на польском сеточном электроинтеграторе AP-600 [7] и электроинтеграторе конструкции ЦНИИКИВР [6], показали, что величина  $\Delta L$  в течение одного года изменяется от 0 до 35 м и при одних и тех же гидрогеологических условиях определяется положением уровня воды в реке.

Результаты определения фильтрационного сопротивления ложа р. Днепр различными методами представлены в табл. 1.

Сопоставление величин гидродинамического сопротивления ложа реки показало, что значения  $\Delta L$ , полученные по теоретическим зависимостям, не учитывающим уровня поверхностных и подземных вод (формула (1)), а также для условий нестационарного режима в период паводка (формула (4)), получились в 2...3 раза больше, чем определенные по данным режимных наблюдений при стационарном положении кривой депрессии и методами моделирования.

Из анализа многолетних наблюдений за режимом поверхностных вод видно, что годовой ход уровней и расходов на

Таблица 1. Значения фильтрационного сопротивления  $\Delta L$ , м

Способ определения						
По теоретической зависимости	По режимным наблюдениям		По опытным откачкам		По результатам моделирования	
Формула (1)	При стационарном положении кривой депрессии	При неустановившемся режиме (в паводок)	Формула (6)	Формула (8)	Естественный режим	Нарушенный режим
11,4	6 (118,70) 12 (118,30) 19 (117,75) 32 (116,75)	66-130	21,8 (117,98) 33,0 (116,89)	12 (117,90) 35,4 (116,87)	0 (119,20) 10 (118,30)	30 (116,85)

Примечание. В скобках приведена отметка уровня воды в р.Днепр.

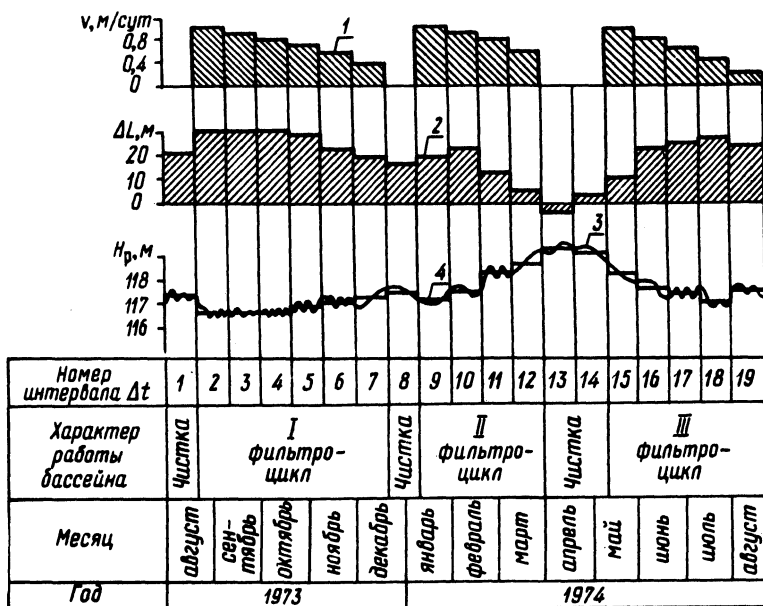


Рис. 1. Динамика скорости инфильтрации из бассейнов, значения  $\Delta L$  и уровня воды р.Днепр (1973-1974 гг.): 1 - скорость инфильтрации; 2 - величина  $\Delta L$ ; 3 - уровень воды в реке; 4 - осредненный по интервалам уровень воды в реке.

исследуемом участке р. Днепр характеризуется высокими их значениями во время весеннего половодья, а также летней меженью, почти ежегодно прерываемой дождевыми паводками, и весьма устойчивой зимней меженью. Весеннее половодье, как правило, начинается в первой декаде марта, а в отдельные годы в начале февраля или апреля. Продолжительность подъема составляет в среднем 30...40 дней, после чего наступает спад уровней, продолжающийся около 2 месяцев. Заканчивается паводье обычно в середине июня (рис. 1).

Среднегодовая мутность речных вод за период 1967--1968 гг. составляет 14,6 мг/л, наибольшая мутность зафиксирована 20 апреля 1967 г. (128 мг/л).

Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, а в период половодья (в течение 2...3 месяцев) за счет вод Днепра. Режим грунтовых вод (особенно прирусловой части) тесно связан с режимом реки. Изучение режима поверхностных и подземных вод, а также наблюдения за твердым стоком р. Днепр позволило годовую работу инфильтрационного водозабора разделить на три периода (три фильтроцикла).

I. Летне-осенний период начинается в августе и заканчивается в декабре (продолжительность 120 дней). Этот период характеризуется минимальными абсолютными отметками уровня воды в реке, которые постепенно повышаются с 116,7 до 117,8 м. В этот период наблюдается незначительная мутность речных вод, колеблющаяся от 7,8 до 20,7 мг/л (средняя составляет 12,1 мг/л).

II. Зимний период продолжается с января по март (80 дней). Абсолютные отметки уровня воды в реке в этот период несколько выше и колеблются от 117,2 до 118,8 м. Учитывая, что в период зимней межени количество взвесей в речной воде минимальное (4,8...7,1 мг/л), кольматация дна инфильтрационного бассейна будет происходить не так быстро, как в I период, и поэтому скорости инфильтрации будут несколько выше.

III. Весенне-летний период включает май...июль (80 дней) и характеризуется снижением уровня воды р. Днепр с 118,8 до 116,8 м. В этот период после весеннего половодья в реке отмечается мутность от 5,4 до 18,5 мг/л, поэтому снижение водоотдачи инфильтрационных бассейнов происходит несколько быстрее по сравнению со II периодом.

В течение года между фильтроциклами необходимо предусмотреть три чистки бассейнов инфильтрации и отстойников, которые лучше всего приурочить к периодам повышения

уровня воды в реке. Так, первую чистку после летне-осеннего периода желательно проводить с середины декабря, когда заметно повышается уровень воды (с абсолютной отметки 117,2 до 118,0 м), вторую -- в период половодья, когда путем инфильтрации воды из реки будет происходить естественное восполнение запасов подземных вод. В этот период река несет максимальное количество взвешенных частиц (45,0...128,0 мг/л), и поэтому для предотвращения глубокого заиления фильтрующей толщи отстойников и бассейнов эксплуатация их нежелательна.

Для прогноза работы водозабора подземных вод с искусственным восполнением с учетом изменения условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод и изменения водоотдачи бассейнов была произведена схематизация области фильтрации и составлена электрическая модель.

Обычно на сплошных электрических моделях реку воспроизводят в виде проволочной шины, на которой задается линейное падение напряжения, соответствующее перепаду абсолютных отметок уровня воды в реке. При этом условия связи подземных и поверхностных вод (уровень воды в реке и параметр  $\Delta L$ ) для решаемых задач принимаются постоянными.

Для более точного прогноза работы водозаборов, расположенных в речных долинах, необходим учет изменения условий взаимосвязи в течение года. Прежде всего это имеет большое значение для выбора оптимального режима работы инфильтрационного водозабора. Учет изменения условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод на сплошной модели возможен, если дополнительный лист электропроводной бумаги, соответствующий величине  $\Delta L$ , заменить эквивалентным ему переменным электрическим сопротивлением  $R_{\Delta L}$ , через которое на шине, моделирующей реку, задаются потенциалы, соответствующие уровню воды в реке, т.е. воспроизводится гидрограф реки.

На электроинтеграторе конструкции ЦНИИКИВР [6] моделировался фрагмент участка водозабора (производительность 30 тыс. м<sup>3</sup>/сут), состоящего из 18 скважин и 5 бассейнов инфильтрации. Река на модели воспроизводилась в виде проволочной шины, на которую через переменное сопротивление  $R_{\Delta L}$  задавалось меняющееся во времени напряжение (граничное условие первого рода).

Инфильтрация атмосферных осадков ввиду ее малого влияния на изменение уровней грунтовых вод во внимание не принималась. Весь годовой цикл работы водозабора был разбит

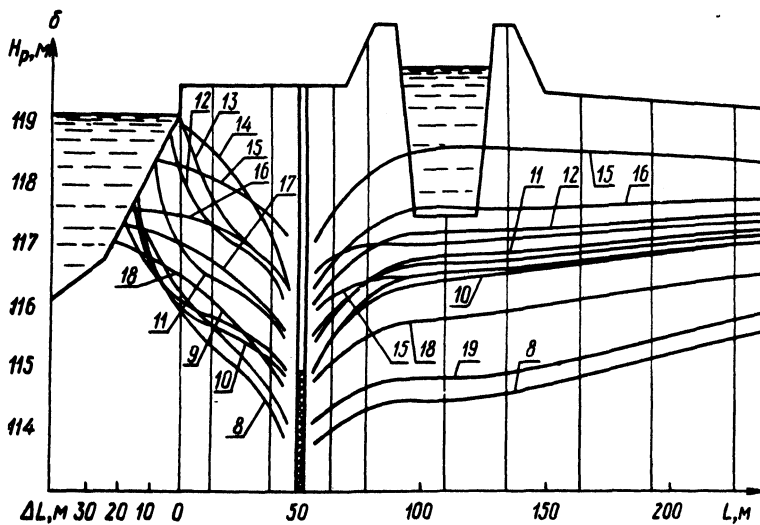
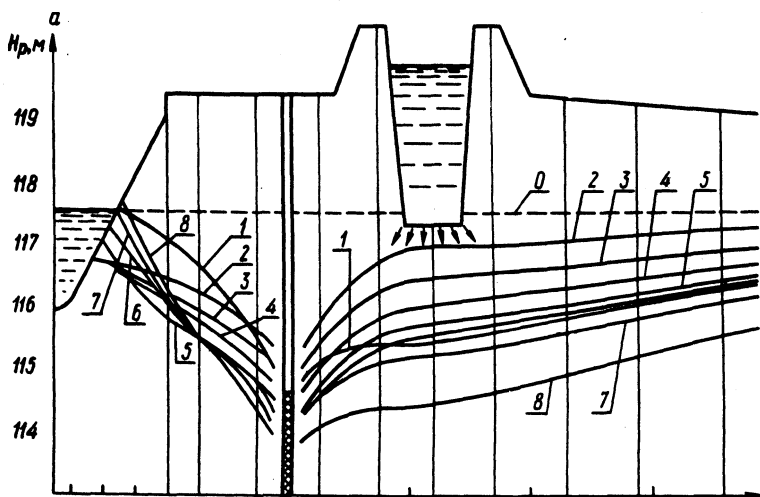


Рис. 2. Прогнозное положение уровня грунтовых вод на опытном участке с учетом значения  $\Delta L$  и скорости инфильтрации из бассейнов; а) с 1-го по 8-й интервал времени; б) с 8-го по 10-й интервал времени (0...19 – номера интервала времени).



на равные интервалы времени  $\Delta t$ . Величина шагов во времени была принята равной 20 суткам. На границах области в процессе решения прогнозной задачи задавались численные значения функций, описывающих ход изменения уровней (расходов) в течение всего года (рис. 1). При данных расходах ( $Q = 70 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), отбираемых из эксплуатационных скважин, для оценки понижений в самих скважинах вводились дополнительные сопротивления, учитывающие несоответствие диаметра электрода диаметру скважины в масштабе модели и резкое искривление потока вблизи скважины. На каждый интервал времени ( $\Delta t = 20 \text{ сут}$ ) в контрольных точках поля фиксировались значения потенциалов. Затем для последующего по времени шага все конденсаторы заряжались в соответствии с полученными на предыдущем шаге значениями потенциалов.

По описанной методике было проведено моделирование 19 расчетных шагов по времени. За начальные условия принималась карта гидроизогипс, построенная на начало августа 1973 г. по данным режимных наблюдений. Проанализируем изменение уровня грунтовых вод на участке водозабора за первые три шага по времени. В результате групповой откачки, целью которой является создание аккумулялирующей емкости, необходимой для перевода поверхностных вод в подземные, уровень грунтовых вод под дном бассейна снизился на 2,1 м, а в эксплуатационных скважинах на 7,8 м (рис. 2). С включением в работу бассейнов со скоростью инфильтрации 1 м/сут на 20 дней динамический уровень грунтовых вод в скважинах повысился на 0,6 м, а под дном бассейна на 1,4 м.

Уровень воды в реке при этом снизился на 0,8 м. Через 40 суток работы в результате частичной кольматации бассейнов скорости инфильтрации уменьшаются. Поэтому как в эксплуатационных скважинах, так и под бассейном наблюдается снижение динамического уровня грунтовых вод соответственно на 0,4 и 0,55 м. Отметка уровня воды в реке при этом остается постоянной.

Наблюдения за формированием "бугра" грунтовых вод, образующегося под бассейном инфильтрации, показали, что он формируется в основном уже за первые 5 суток, затем происходит незначительное повышение уровня грунтовых вод между бассейном и рядом эксплуатационных скважин. При скорости инфильтрации, равной 1 м/сут, за первые 5 суток уровень под дном бассейна повысился на 1,1 м, а в эксплуатационных скважинах - на 0,32 м; за вторые 5 суток уровень грунтовых вод соответственно повысился на 0,24 м и 0,1 м. На

незначительное повышение уровня воды в эксплуатационных скважинах влияет падение уровня воды в реке на 0,8 м. Необходимо отметить, что скорость инфильтрации была принята на основании результатов полевых исследований по определению отдачи инфильтрационного бассейна.

Ход изменения уровня грунтовых вод на участке водозабора в течение всего года легко проследить по рис. 2.

Таким образом, в любой период с помощью моделирования можно определить положение динамического уровня грунтовых вод в эксплуатационных скважинах и выбрать оптимальный режим их работы.

Проведенные исследования показали, что в период летней межени с учетом сопротивления ложа реки и при работе бассейнов со скоростью инфильтрации 1 м/сут из реки привлекается 34,9% всех вод, отбираемых водозабором. Без учета параметра  $\Delta L$  величина отбора из реки возрастает до 39%. Из инфильтрационного бассейна в этот период к водозабору привлекается 48%, а со стороны коренного берега 7,1%.

Хорошо известно, что в период весеннего половодья происходит естественное восполнение запасов подземных вод. Такая фильтрация существенно влияет на динамику уровня подземных вод в зоне влияния водозабора. Оценка берегового регулирования речного стока с помощью моделирования показала, что за счет реки в период паводка формируется 98,7% всех вод, отбираемых водозабором, и поэтому в это время целесообразно отключать бассейны инфильтрации и проводить их чистку.

Анализ результатов расчета гидродинамического несовершенства ложа реки различными способами и путем прогнозного моделирования работы инфильтрационного водозабора позволяет сделать следующие выводы.

1. Изучение условий взаимосвязи речных и грунтовых вод на опытном водозаборе показало, что величина  $\Delta L$ , характеризующая гидродинамическое несовершенство р. Днепр, изменяется в течение года от 0 до 35 м и определяется также положением уровня воды в реке.

2. Наиболее сопоставимые результаты в определении  $\Delta L$  (при разных методах их расчета) получаются при использовании сведений о стационарном положении кривой депрессии в естественных и нарушенных условиях.

Зная изменение условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод в течение года, ход водоотдачи инфильтрационных бассейнов в течение фильтрационного цикла, с помощью аналогового

моделирования можно точно прогнозировать режим работы водозабора с системой искусственного восполнения.

### Л и т е р а т у р а

1. Бочеввер Ф.М. Гидрогеологические расчеты крупных подзаборов подземных вод и водопонизительных установок. М., 1963. 2. Бочеввер Ф.М. Оценка производительности береговых водозаборов с учетом несовершенства речных русел. — Тр. ВОДГЕО, 1966, вып. 13. 3. Григорьев В.М. Расчет подрусловых инфильтрационных водозаборов. — Тр. ВОДГЕО, 1966, вып. 13. 4. Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М., 1973. 5. Зеегофер Ю.О., Шестаков В.М. Методика обработки данных опытных откачек вблизи рек. — Разведка и охрана недр, 1968, №9. 6. Усенко В.С., Богатова Л.К. Электроинтегратор с дискретно распределенной емкостью и методика моделирования на нем гидрогеологических задач. — В сб.: Мат-лы зонального совещ. по гидрогеол. и инженерн. геол. Минск, 1972. 7. Усенко В.С. и др. Опыт регулирования запасов подземных вод в долине Днепра. — В сб.: Мат-лы Всесоюзн.науч.-техн. совещания "Комплексное использование водных ресурсов" (секция водохозяйственных балансов). Минск, 1975. 8. Шестаков В.М. Оценка сопротивления ложа водоемов при гидрогеологических расчетах. — Разведка и охрана недр, 1964, №5.

УДК 626.86+626.212

Г.Г.Круглов

### ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ПРИДАМБОВОЙ ДРЕНЫ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ НАД НЕЙ УЧАСТКА НАВИСАНИЯ

Создание водохранилищ в условиях равнинных рек вызывает затопление и подтопление территорий значительных размеров, вследствие чего возникает необходимость строительства защитных сооружений. Как правило, в их состав входит (рис.1) дамба обвалования и защитный дренаж, назначение которого поддерживать необходимую отметку уровня грунтовых вод на защищаемой территории. Исходя из этого условия выбирается местоположение трассы дренажа, глубина его заложения и диаметр.

Фильтрационный расчет (определение дебита дрены и построение депрессионных кривых) несовершенной придамбовой