

П. ИЫГАР

## СХЕМАТИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ГЕОФИЛЬТРАЦИИ НА ПАНДИВЕРЕСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ ЭСТОНИИ

**Общие сведения к постановке проблемы.** Крупнейшая водораздельная возвышенность Эстонии — Пандивереская — распространяется в северо-восточной части республики на площади около 3000 км<sup>2</sup>, образуя при этом пологое куполообразное поднятие коренных пород с относительной высотой 50—60 м. Абсолютные отметки водораздельной части возвышенности достигают 120—130 м.

Коренные породы ордовика и силура — известняки и доломиты, а также мергелистые и глинистые разновидности последних, залегают в пределах возвышенности повсеместно моноклинально с небольшим падением слоев с севера на юг (рис. 1). При этом полосы выходов отдельных стратиграфических горизонтов простираются, как правило, в плане в широтном направлении, образуя изгибы в местах прохождения ими древних погребенных долин. Немаловажным с гидрогеологической точки зрения является то, что ширина полос выхода горизонтов (соответственно и водоносных горизонтов) ввиду моноклинальности падения слоев севернее водораздела намного уже, чем на южном и юго-западном склонах возвышенности. При этом значительно различаются площади питания водоносных горизонтов при одинаковой мощности последних.

Коренные породы всюду покрыты четвертичными отложениями — чаще моренной супесью с различным содержанием в ней валунов, галек и гравия, реже лимногляциальных песками и глинистыми осадками. Мощность четвертичного покрова колеблется от 0,5 м на северных участках возвышенности до 40—50 м в центральных участках погребенных долин.

Характерной особенностью гидрогеологической обстановки Пандивереской возвышенности и ее окрестностей является значительная роль зон тектонических нарушений, разломов и тектонической трещиновато-

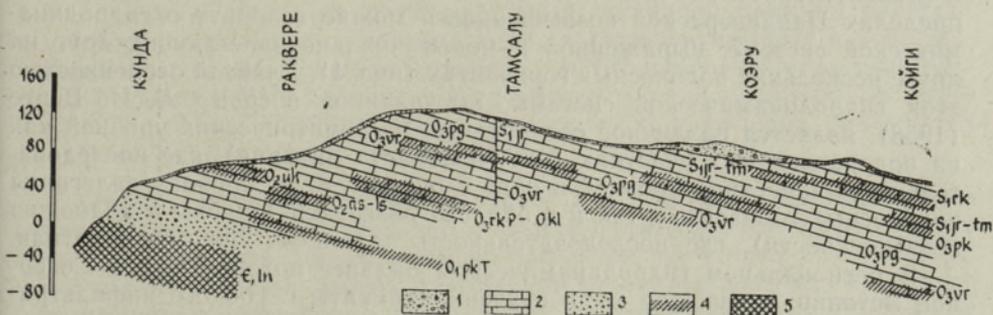


Рис. 1. Распространение водоносных горизонтов и водоупоров в коренных породах Пандивереской возвышенности. 1 — четвертичные отложения, 2 — известняки, доломиты и мергели, 3 — песчаники, 4 — водоупорные породы, 5 — кембрийские «синие» глины.

сти, а также древних погребенных долин в формировании динамики и химического состава подземных вод (Верте, 1962; Йыгар, Олли, 1973). Тектоническая трещиноватость усугубляет развитие карстовых явлений как на поверхности земли (воронки поглощения), так и в недрах коренных пород (кавернозность, наличие пустот), значение которых в процессе интенсивной инфильтрации атмосферных осадков огромное. Благодаря развитию карста и маломощному покрову четвертичных отложений на своде возвышенности площадью 1375 км<sup>2</sup> не развита гидрографическая сеть (т. н. инфильтрационный бассейн, по Т. Ф. Эйпре (1981)).

Гидрогеологическая роль Пандивереской возвышенности как области питания основных водоносных комплексов и горизонтов, а также формирования напора огромна. Мнения разных авторов сходятся в том, что инфильтровавшие на своде возвышенности огромные массы воды разгружаются на склонах и подножьях в виде отдельных и групповых родников, а также в виде площадной фильтрации, являющейся причиной переувлажнения земель. Особенно широко распространяются заболоченные участки, обусловленные притоком напорных вод, на западном, южном и восточном склонах возвышенности (Кинк, 1976).

Однако следует отметить, что механизму разгрузки подземных вод уделяется мало внимания, обычно ограничиваются лишь утверждением, что разгружаются напорные воды, или артезианские воды, или карстовые воды. Несколько подробнее механизм разгрузки описан Л. К. Валлнером (1979, 1980). Разгрузка, по его мнению, осуществляется частично сформировавшимися на водораздельных частях возвышенности потоками со свободной поверхностью, гидравлически не связанными с реками и разгружающимися через постоянно или периодически действующие нисходящие родники. Особое значение они имеют в зонах тектонических нарушений, пересекающихся с межпластовыми потоками вод. Поток при встрече на своем пути барьеров в виде сбросов и сдвигов изменяет направление и поднимается через зоны трещин вверх. В местах пересечений тектонических нарушений с долинами рек возникают мощные восходящие родники.

По данным Т. Ф. Эйпре (1981), из атмосферных осадков, выпадающих на возвышенности, просачивается 38% (395 млн. м<sup>3</sup> в год). Из них 221 млн. м<sup>3</sup> разгружается в родниках, а 174 млн. м<sup>3</sup> (44%) идет на питание глубоких подземных вод с последующей разгрузкой в руслах. По данным Л. К. Валлнера (1979), доля подземных вод с напорной поверхностью в межвенном стоке несколько ниже — 20—60%.

Поскольку в разрезе карбонатных пород залегают относительно слабопроницаемые глинистые известняки и мергели, а также известняки с относительно слабо развитой трещиноватостью (Перенс, 1978), то в пределах Пандивереской возвышенности можно говорить о гидродинамической системе, выраженной в моноκлинално залегающих друг на друге нескольких водоносных горизонтах (рис. 1). Главной особенностью этой гидродинамической системы, высказанной впервые А. И. Верте (1958), является различное соотношение пьезометрических уровней как на водораздельных участках (т. е. в области питания), где последовательность залегания уровней в общем соответствует порядку залегания водоносных горизонтов, так и в области разгрузки (склоны и подножья возвышенности), где последовательность залегания уровней обратная.

В региональном гидродинамическом балансе подземных вод Северной Эстонии до сих пор мало изучены элементы глубокого инфильтрационного питания подземных вод и их последующая разгрузка далеко за пределами области питания. Одним из перспективных путей для разрешения этого вопроса является применение различных способов моделирования. Целью настоящей статьи является схематизация фильтрационных потоков подземных вод в пределах Пандивереской возвы-

шенности на уровне водоносных горизонтов ордовика и силура, а также представление численных значений параметров фильтрации.

**Исследование водообмена между водоносными горизонтами.** Параметры поперечной фильтрации водоупорных пород, с помощью которых можно рассчитать количество перетекающей воды, являются необходимыми данными при составлении регионального баланса подземных вод. Поскольку этих данных опубликовано мало, то в настоящей статье вопросам водообмена уделено особое внимание. Водообмен, с нашей точки зрения, рассматривается как результат площадной фильтрации.

Согласно общеизвестной формуле Дарси, при почти одинаковых мощностях водоупора, а также при одинаковых параметрах водопроницаемости, количество фильтрующей через водоупор воды зависит прежде всего от разности напоров. Фильтрация может быть либо нисходящей, либо восходящей, за исключением случаев, когда напоры смежных водоносных горизонтов равны и фильтрации не происходит.

В рамках настоящей работы основным объектом анализа были карты пьезометрической поверхности отдельных водоносных горизонтов на площадях распространения в них напорных вод, составленные при помощи ЭВМ «Найри» методом линейной интерполяции. Опорными точками приняты эксплуатационные и разведочные скважины, вскрывающие своими рабочими частями рассматриваемый водоносный горизонт. В некоторых случаях были использованы обобщенные (осредненные) по группам скважин пьезометрические уровни данного водоносного горизонта.

Составлены карты по следующим водоносным горизонтам (Йыгар, 1977): а) ласнамяги-кундаский ( $O_2 ls—O_1 kn$ ); б) кейла-кукрузеский ( $O_2 kl—O_2 kk$ ); в) набала-раквереский ( $O_3 nb—O_3 rk$ ); г) поркуни-пиргуский ( $O_3 rk—O_3 pg$ ); д) тамсалу-юурусский ( $S_1 tm—S_1 jr$ ). Между этими водоносными горизонтами залегают относительно водоупорные породы, приуроченные соответственно к ухакускому ( $O_2 uh$ ), оандускому ( $O_2 op$ ), кейласкому ( $O_2 kl$ ), vormискому ( $O_3 vr$ ), нижней части юурусского ( $S_1 jr$ ) и нижней части райккюлаского ( $S_1 rk_1$ ) горизонтов.

Составлена также карта уровней безнапорных вод первого от поверхности земли водоносного горизонта, которая в сущности является продолжением упомянутых выше карт на выходах водоносных горизонтов на поверхность земли. (По данным 600 шахтных колодцев, обследованных в летне-осенний минимум уровня подземных вод\*.)

На основе всех перечисленных карт была рассчитана средняя разница  $\Delta H$  между пьезометрическими уровнями первого, второго и третьего от поверхности земли водоносного горизонтов (соответственно  $\Delta H_{I-II}$  и  $\Delta H_{II-III}$ ). В качестве расчетных площадей приняты площади водосборов отдельных временных гидростворов, на которых в ходе экспедиционных работ Гидрометеослужбы ЭССР измерены меженные расходы рек (табл. VIII.7 в монографии «Ресурсы поверхностных вод. Эстония». Т. 4., вып. 1, 1972). Места временных гидростворов указаны на рис. 2 как замыкающие точки водосборов.

Детальная карта пьезометрического уровня I от поверхности земли водоносного горизонта дала возможность определить в пределах инфильтрационного бассейна и его сопредельных областей площади подземных водосборов, при которых учтены не водоразделы топографического рельефа, а водоразделы потоков подземных вод. В некоторых случаях изменились существенно (по сравнению с принятыми в специальной литературе) величины и конфигурации площади водосборов, особенно в верховьях рек, стекающих

\* Данные геолого-гидрогеологических съемок Управления геологии ЭССР и маршрутных обследований автора (около 250 точек).

Основные показатели водообмена между водоносными горизонтами и параметры фильтрации коренных пород Пандиверской возвышенности

Номер расчетной площади (рис. 2)	2	3	Соотношение нисходящей и восходящей фильтрации			Параметры фильтрации			
			Средний $\Delta H_{II-II}$ , м <sup>2</sup>	Площадь напорных вод: $H_{II} > H_{II}$ , % (в скобках площадь равной $H_{II} = H_{II}$ )	Средний $\Delta H_{II-II}$ , м <sup>2</sup>	Площадь напорных вод: $H_{III} > H_{III}$ , % (в скобках площадь равных уровней $H_{III} = H_{III}$ )	Коэффициент поперечной фильтрации, м/сут (в скобках водоупор)	Водопроницаемость, м <sup>2</sup> /сут (в скобках водоносные горизонты)	
1									
2	<b>р. Ягала</b>								
1	г/п Кырве	3,9 *	-9,04 (nb/kl)	—	-4,6 (kl/l/s)	—	1,2 · 10 <sup>-5</sup> (on)	20 (nb),	
2	ж.-д. мост	3,0 *	-4,92 (nb/kl)	6,7 (10)	-8,11 (kl/l/s)	—	2,7 · 10 <sup>-5</sup> (on)	170 (kl),	
3	х. Яанивекски	потеря стока	+2,21 (nb/kl)	48 (36)	-9,28 (kl/l/s)	—	1,1 · 10 <sup>-3</sup> (on)	240 (ls)	
4	"	2,1 *	+0,12 (nb/kl)	31 (46,1)	-8,62 (kl/l/s)	7,7 (—)	1,3 · 10 <sup>-3</sup> (on)	70 (nb), 40 (kl)	
5	ист. Янеда	9,6 (33,3)	+0,86 (nb/kl)	54,5 (18,2)	-17,3 (kl/l/s)	20 (10)	3,0 · 10 <sup>-4</sup> (vr)	70 (nb)	
6	д. Прууна	0,08 (145,6)	-4,93 (pg/nb)	12,5 (20)	-2,7 (nb/kl)	44 (18,5)	—	35 (nb)	
7	д. Ветепере	1,94 (109,0)	-5,5 (pg/nb)	3,7 (18,5)	+1,0 (nb/kl)	36 (13,6)	—	125 (pg), 135 (nb)	
8	д. Ветепере	0,81 (71,2)	-5,61 (tm/pg)	4,5 (18,2)	-1,68 (pg/nb)	—	—	20 (pg), 30 (nb),	
9	д. Сайа	3,2 *	-3,85 (pg/nb)	6,9 (24,1)	—	—	—	10 (kl)	
10	ист. Кихме	0,71 (33,6)	-3,6 (tm/pg)	— (20)	-4,4 (pg/nb)	— (10)	4,3 · 10 <sup>-4</sup> (jr)	—	
11	<b>р. Валгейги</b>								
12	г/п Ванакоула	потеря стока	-6,79 (kl/l/s)	—	-4,38 (kl/l/s)	—	3,3 · 10 <sup>-4</sup> (uh)	—	
13	д. Суру	"	-9,61 (nb/kl)	—	-8,33 (kl/l/s)	—	1,2 · 10 <sup>-3</sup> (on)	—	
14	устье р. Пала	2,6 *	-7,28 (nb/kl)	—	-8,43 (kl/l/s)	—	1,1 · 10 <sup>-4</sup> (on)	—	
15	д. Пала	5,93 (72,4)	-7,9 (nb/kl)	—	-10,67 (kl/l/s)	—	3,6 · 10 <sup>-5</sup> (on)	85 (pg), 150 (nb)	
16	ист. Коннавере	2,79 (51,9)	-13,89 (nb/kl)	—	-5,24 (nb/kl)	5,3 (15,8)	—	20 (kl)	
17	г. Тапа	12,0 *	-11,08 (pg/nb)	—	-11,86 (nb/kl)	—	5,4 · 10 <sup>-4</sup> (vr)	65 (nb)	
17	д. Поркуни	0,52 (64,4)	-9,92 (pg/nb)	—	—	—	—	—	
18	<b>р. Лообу</b>								
18	г/п Арбавере	3,4 *	-10,22 (kl/l/s)	—	-6,5 (kl/l/s)	—	—	25 (ls)	
19	д. Вохья	4,7 *	-8,6 (nb/kl)	—	-6,67 (kl/l/s)	—	—	20 (kl)	
20	д. Кадрина	4,51 (42,6)	-10,57 (nb/kl)	—	—	—	—	60 (nb), 25 (kl)	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	пос. Кадрина	2,51 (45,8)	-13,21 (nb/kl)	—	-5,63 (kl/s)	—	7,3·10 <sup>-5</sup> (on)	10 (kl), 20 (ls)
22	ист. Йьелере	6,43 (16,3)	-22,08 (nb/kl)	—	-7,83 (kl/s)	—	—	—
<b>Р. Сельге</b>								
23	д. Аркна	4,1 (148,5)	-8,72 (nb/kl)	7,3 (4,9)	-4,65 (kl/s)	—	8,4·10 <sup>-5</sup> (uh)	95 (kl), 265 (ls)
24	г/п Аркна	потеря стока	+0,5 (nb/kl)	33 (33)	-5,6 (kl/s)	—	—	85 (ls)
25	ист. Вегуку	2,23 (60,9)	-10,61 (nb/kl)	5,5 (16,6)	-7,27 (kl/s)	—	—	—
26	ист. Мыдрику	5,51 (32,8)	-7,45 (nb/kl)	— (9,1)	-6,54 (kl/s)	—	—	—
<b>Р. Кунда</b>								
27	г/п Сяма	6,93 (63,6)	-2,72 (kl/s)	16,6 (16,6)	+2,27 (kl/s)	72,7 (18)	—	85 (kl), 45 (ls)
28	ист. Лави	4,94 (39,4)	-11,86 (nb/kl)	—	-3,83 (kl/s)	16,6 (—)	—	(30 nb), 20 (kl),
29	ист. Вооре	3,45 (11,6)	-12,25 (nb/kl)	—	-3,25 (nb/kl)	17,9 (2,6)	—	20 (ls)
30	д. Аравусе	2,44 (147,6)	-13,04 (pg/nb)	2,6 (7,7)	—	—	—	130 (nb), 45 (kl)
<b>Р. Пярну</b>								
31	д. Реа	3,2*	+1,43 (tm/pg)	65,5 (10,3)	-2,06 (pg/nb)	24,1 (3)	1,0·10 <sup>-2</sup> (jr)	150 (pg), 30 (nb)
32	г/п Кюкита	11,87 (40,0)	+0,04 (tm/pg)	16,6 (69)	-0,15 (pg/nb)	15,1 (69)	—	—
33	ист. Роосна	3,84 (72,4)	-2,76 (tm/pg)	9,5 (28,6)	-7,0 (pg/nb)	4,8 (9,5)	1,6·10 <sup>-2</sup> (jr)	310 (pg)
34	г/п Пыхьяка	5,33 (131,2)	-0,24 (rk/tm)	31,8 (35,5)	-2,56 (tm/pg)	8,9 (40)	—	155 (tm), 500 (pg)
35	д. Койги	0,32 (129,6)	-1,59 (rk/tm)	21 (23,6)	-2,11 (tm/pg)	2,6 (34,2)	3,5·10 <sup>-3</sup> (rk <sub>I</sub> )	160 (tm), 15 (pg)
36	г. Тюри	9,0 (86,6)	-1,68 (rk/tm)	— (41)	+1,25 (tm/pg)	50 (50)	—	140 (tm), 150 (pg)
37	д. Аникола	3,43 (49,6)	-1,9 (rk/tm)	13,3 (20)	+1,0 (tm/pg)	33 (40)	1,8·10 <sup>-3</sup> (rk <sub>I</sub> )	75 (tm), 170 (pg)
38	г/п Тора	8,26 (139,2)	-3,34 (rk <sub>II</sub> /rk <sub>I</sub> )	— (24,4)	-1,21 (rk/tm)	17 (36,6)	4,5·10 <sup>-4</sup> (rk <sub>I</sub> )	200 (tm)
39	ист. Пранди	6,37 (42,8)	-2,26 (rk <sub>II</sub> /rk <sub>I</sub> )	— (38,4)	+0,73 (rk/tm)	38,5 (46,2)	—	—
<b>Р. Пылтсамаа</b>								
40	г/п Ао	5,48 (129,6)	-4,27 (tm/pg)	12,9 (22,5)	+2,6 (pg/nb)	61,2 (29)	—	565 (pg)
41	пос. Кильтси	1,48 (40,4)	-9,28 (tm/jr)	— (7,1)	+0,57 (pg/nb)	21,4 (42,8)	—	85 (pg), 10 (nb)
42	г/п Яраннуку	3,9 (69,2)	-8,1 (tm/pg)	—	-5,22 (pg/nb)	20 (10)	1,8·10 <sup>-4</sup> (jr)	460 (pg)
43	д. Лийваалла	1,25 (87,2)	+1,17 (tm/pg)	50 (30,8)	-4,65 (pg/nb)	19,2 (11,5)	—	305 (pg)
44	г/п Кярса	7,83 (16,6)	-6,85 (tm/pg)	—	+3,0 (pg/nb)	57 (28,5)	—	—
45	ш. мост Презди	15,24 (32,8)	+1,77 (rk/tm)	72,7 (—)	-1,45 (tm/pg)	— (45,4)	3,4·10 <sup>-3</sup> (rk <sub>I</sub> )	375 (tm), 550 (pg)
46	ист. Норра	7,13 (32,8)	+0,09 (rk/tm)	45,5 (45,5)	-0,18 (tm/pg)	36,4 (18)	—	—
47	мельня. Вардья	5,0 (46,0)	+3,28 (rk/tm)	75 (12,5)	+0,12 (tm/pg)	50 (18,7)	2,1·10 <sup>-3</sup> (rk <sub>I</sub> )	—

1	2	3	4	5	6	7	8	9
48	устье р. Муст- йыги	2,9*	-3,96 (rk/tm)	22,4 (6,1)	+6,78 (tm/pg)	83,6 (2)	2,2 · 10 <sup>-3</sup> (гк <sub>г</sub> )	
49	ш. мост	2,0*	-4,41 (rk/tm)	7,1 (-)	-2,28 (tm/pg)	- (21,4)		
50	д. Рутиквере	4,6*	-3,73 (rk/tm)	4,4 (15,5)	+1,96 (tm/pg)	53,3 (27)		
	<b>р. Педья</b>							
51	ист. Слмуна	1,73 (45,6)	-8,35 (tm/pg)	-	-2,21 (pg/nb)	28,6 (21,4)	1,5 · 10 <sup>-4</sup> (гг)	400 (pg)
52	устье р. Пеэдла	0,92 (28,0)	-2,0 (tm/pg)	33 (22,2)	+1,94 (pg/nb)	33 (-)		
53	ш. мост	2,71 (330,8)	-1,32 (tm/pg)	36,3 (12,1)	-0,33 (pg/nb)	41,7 (18,6)	1,5 · 10 <sup>-3</sup> (гг)	225 (tm), 380 (pg)
54	устье р. Онга	2,15*	-5,14 (rk/tm)	14,2 (8,5)	+3,85 (tm/pg)	65,7 (2,9)	6,5 · 10 <sup>-4</sup> (гк <sub>г</sub> )	

Примечание. г/п — гидропост, х. — хутор, ист. — источник, мельн. — мельница, ш. мост. — шоссейный мост. / — площадь водосбора исходя из водораздела подземных вод (в верховьях рек); модуль определен исходя из расхода по картосхеме 3.8 из монографии Т. Эйпре (1981); звездочкой отмечен модуль стока, по Т. Эйпре, 1981. 2 — знаком «-» отмечена нисходящая фильтрация, знаком «+» — восходящая; в скобках водонесные горизонты (сокращенно), в числителе — верхний, в знаменателе — нижний.

с Пандивереской возвышенности. Таким образом, в результате перерасчета изменились также и модули межженного стока. Все изменения величин площадей водосборов и соответственно модулей стока отражены в таблице.

Основные направления фильтрационных потоков, в том числе нисходящих и восходящих, можно определить путем сопоставления карт пьезометрического уровня смежных водоносных горизонтов. Пример подобного сопоставления приведен на рис. 3, где штриховкой показана область превышения пьезометрического уровня поркуни-пиргуского водоносного горизонта над уровнем тамсалу-юурского водоносного горизонта. Отметим, что высокие модули межженного стока, характеризующие площади восходящих потоков, служат дополнительным подтверждением правильности выбранной схемы фильтрации.

Результаты сопоставления пьезометрических уровней различных водоносных горизонтов приведены в таблице.

По данным Т. Ф. Эйпре (1981), средневзвешенный модуль 30-дневного среднего минимального стока по всей территории Пандивереской возвышенности составляет 3,11 л/сек с 1 км<sup>2</sup>. Наиболее приемлемым для модели стационарной фильтрации является случай, когда высокие модули подземного стока (графа 3 в таблице) совпадают с наличием явной восходящей фильтрации ( $\Delta H_{I-II} > 0$ , графа 4) и, наоборот, низкие модули — с наличием нисходящей фильтрации ( $\Delta H_{I-II} < 0$ ). На рис. 4 площади с высокими модулями (наряду с восходящей фильтрацией) показаны штриховкой.

Более подробно это соответствие проверялось с помощью коэффициентов парной корреляции  $r_{xy}$  между модулями стока различных регионов (водосборов) и параметрами фильтрации ( $\Delta H_{I-II}$ ,  $\Delta H_{II-III}$ ), а также характеристиками площадного водообмена и мощностью четвертичных отложений. Анализ парной корреляции позволяет сделать выводы о существенном влиянии зон тектонических нарушений и тектонической трещиноватости на водообмен между водоносными горизонтами. Из анализа следует также, что равенство напоров уровней сопровождается обычно высокими модулями стока ( $r_{xy}$  колеблется в пределах 0,427—0,728 для бассейна р. Пярну) и является существенным признаком наличия водообмена.

В рамках данной работы вычислялись также коэффициенты поперечной фильтрации различных водоупоров. Расчетная схема в вычислении основывается на гипотезе, что высокие модули стока (свыше 3,11 л/сек с 1 км<sup>2</sup>) сопровождаются преимущественно восходящей фильтрацией, а малые модули — нисходящей фильтрацией. Баланс подземного стока в пределах одной расчетной площади (рис. 2) выражается исходя из формулы Дарси следующим образом:

$$\pm \Delta M \cdot S_{\text{общ.}} = \frac{\Delta H'_{I-II} \cdot k_1 \cdot S_1}{m} - \frac{\Delta H''_{I-II} \cdot k_2 \cdot S_2}{m}, \quad (1)$$

где  $\pm \Delta M$  — приращение модуля подземного стока расчетной площади по сравнению со значением средневзвешенного модуля (3,11 л/сек с 1 км<sup>2</sup>), м<sup>3</sup>/сут с 1 км<sup>2</sup>;

$S_{\text{общ.}} = S_1 + S_2$  — площадь расчетного водосбора, км<sup>2</sup>;

$\Delta H'_{I-II}$  — средняя разница между уровнями I и II водоносных горизонтов в пределах площади восходящей фильтрации (в рамках данной расчетной площади), м;

$\Delta H''_{I-II}$  — то же, в пределах площади нисходящей фильтрации;

$k_1$  — поперечный коэффициент фильтрации I от поверхности земли водоупора по площади восходящей фильтрации, м/сут;

$k_2$  — то же, по площади нисходящей фильтрации, м/сут;

$S_1$  — площадь восходящей фильтрации в пределах данной расчетной площади, м<sup>2</sup>;

$S_2$  — площадь нисходящей фильтрации, м<sup>2</sup>;

$m$  — мощность водоупора, м.

Значения  $k_1$  и  $k_2$  можно найти либо методом наименьших квадратов (при совместном решении уравнений типа (1) для всех расчетных площадей, в пределах которых распространяется данный водоупор), либо решением попарно уравнений типа (1) для двух смежных расчетных площадей как системы уравнений с двумя неизвестными  $k_1$  и  $k_2$ . Так как первый метод не гарантирует положительных (выше нуля) значений  $k_1$  и  $k_2$ , то при расчетах следует предпочитать второй метод.

Результаты вычислений по пяти водоупорам приведены в таблице.

**Характеристика фильтрационных потоков основных водоносных горизонтов.** Как видно из таблицы, на большинстве из расчетных площадей преобладает нисходящая фильтрация, т. е. вышезалегающие водоносные горизонты питают своими водами нижезалегающие. Восходящая фильтрация (площадь напорных вод, графы 5 и 7) распространена преимущественно на южном и западном склонах возвышенности.

Далее приводится краткая характеристика геофильтрации основных водоносных горизонтов.

Ласнамяги-кундаский ( $O_2 ls—O_1 kn$ ) водоносный горизонт (рис. 4а) питается в основном севернее Северо-Эстонского водораздела путем нисходящей фильтрации с вышезалегающих водоносных горизонтов. Фильтрационные потоки данного водоносного горизонта текут с района междуречья рек Валгейыги, Лообу и Кунда в северном и западном направлениях и разгружаются на полосе выхода водовмещающих пород южнее уступа глинта. По всему пути транзита происходит равномерная нисходящая фильтрация в нижезалегающий ордовикско-кембрийский водоносный горизонт.

Величины водопроводимости водоносного горизонта колеблются в пределах 20—265 л<sup>2</sup>/сут, причем наибольшие значения приобщаются к тектоническим зонам нарушений вблизи г. Раквере и вдоль р. Кунда (таблица).

Кейла-кукрузеский ( $O_2 kl—O_2 kk$ ) водоносный горизонт (рис. 4б) питается в основном за счет вод вышезалегающего набала-раквереского водоносного горизонта. Фильтрационные потоки берут начало с района междуречья рек Валгейыги, Лообу и Ягала в северном направлении и разгружаются в основном на выходе водовмещающих пород. Часть воды идет путем восходящей фильтрации в пополнение запасов вышезалегающего набала-раквереского водоносного горизонта и разгружается в бассейнах рек Ягала и Кунда. Величины водопроводимости водоносного горизонта находятся в пределах 10—95 м<sup>2</sup>/сут с наибольшими значениями в зонах тектонических зон, коэффициенты поперечной фильтрации водоупорного ухакусского горизонта имеют порядок 10<sup>-4</sup> м/сут.

Набала-раквереский ( $O_3 nb—O_3 gk$ ) водоносный горизонт распространяется повсеместно как на северном, так и на южном склонах Пандивереской возвышенности (рис. 4в). На северном склоне воды данного водоносного горизонта разгружаются на значительной территории выхода водовмещающих пород набалаского и раквереского горизонтов, давая на обширных площадях высокие модули подземного стока. На южном склоне воды данного водоносного горизонта идут в пополнение вышезалегающего водоносного горизонта. Такая разгрузка продолжается также за пределами Пандивереской возвышенности. Величины водопроводимости — 10—150 м<sup>2</sup>/сут, коэффициенты фильтрации пород водоупорного оандуского и частично кейлаского горизонтов имеют преимущественно порядок 10<sup>-5</sup> м/сут.

Поркунни-пиргуский ( $O_3 rk—O_3 pg$ ), самый водообильный из рассматриваемых водоносных горизонтов, распространяется на южном склоне и подножье Пандивереской возвышенности (рис. 4г). Воды этого водоносного горизонта поднимаются через тектонические трещины, а также

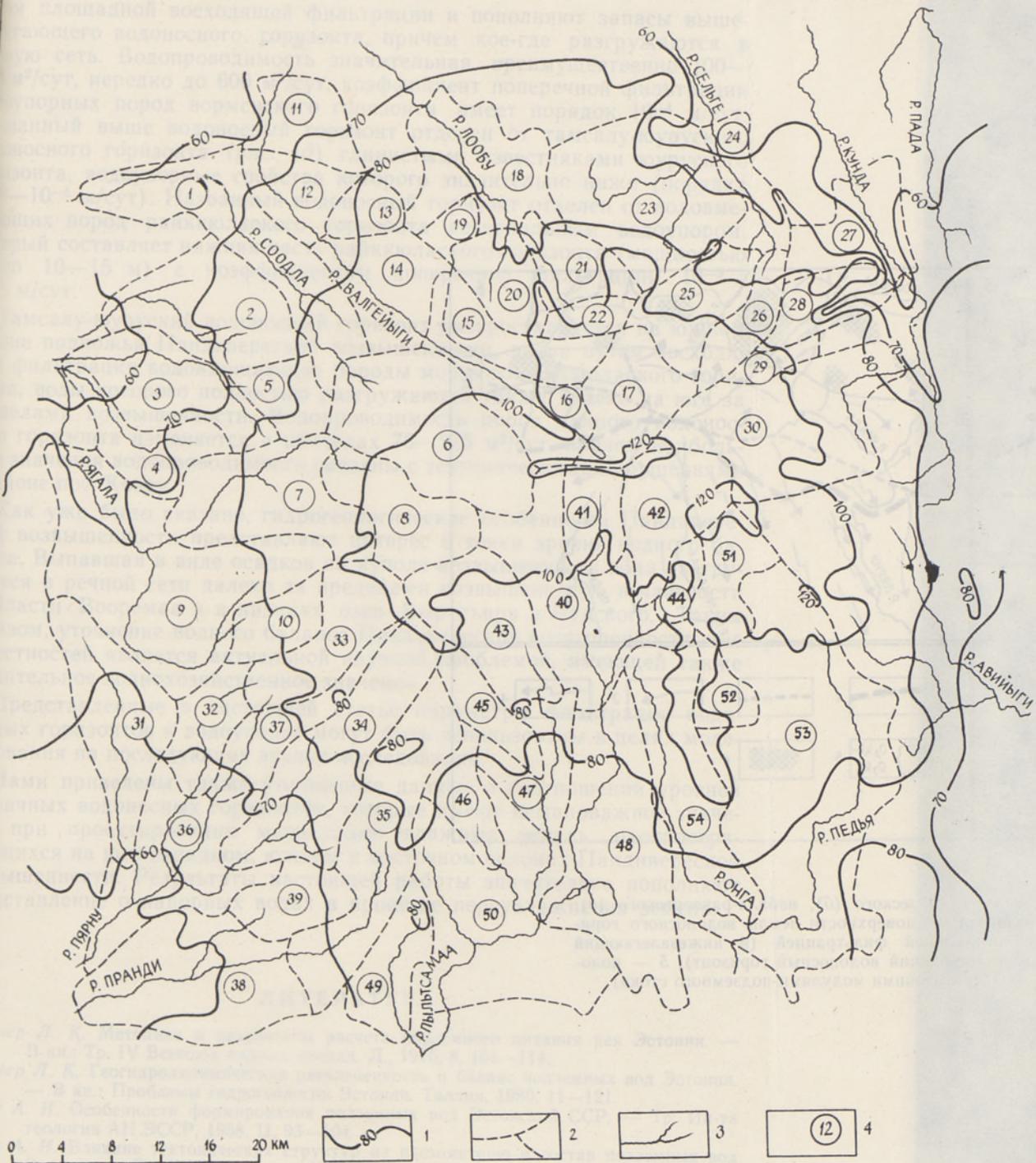


Рис. 2. Схема расположения расчетных площадей на территории Пандивереской возвышенности. 1 — гидроизоэпезы I от поверхности земли водоносного горизонта, 2 — границы расчетных площадей (водосборов), 3 — реки, 4 — номер расчетной площади.

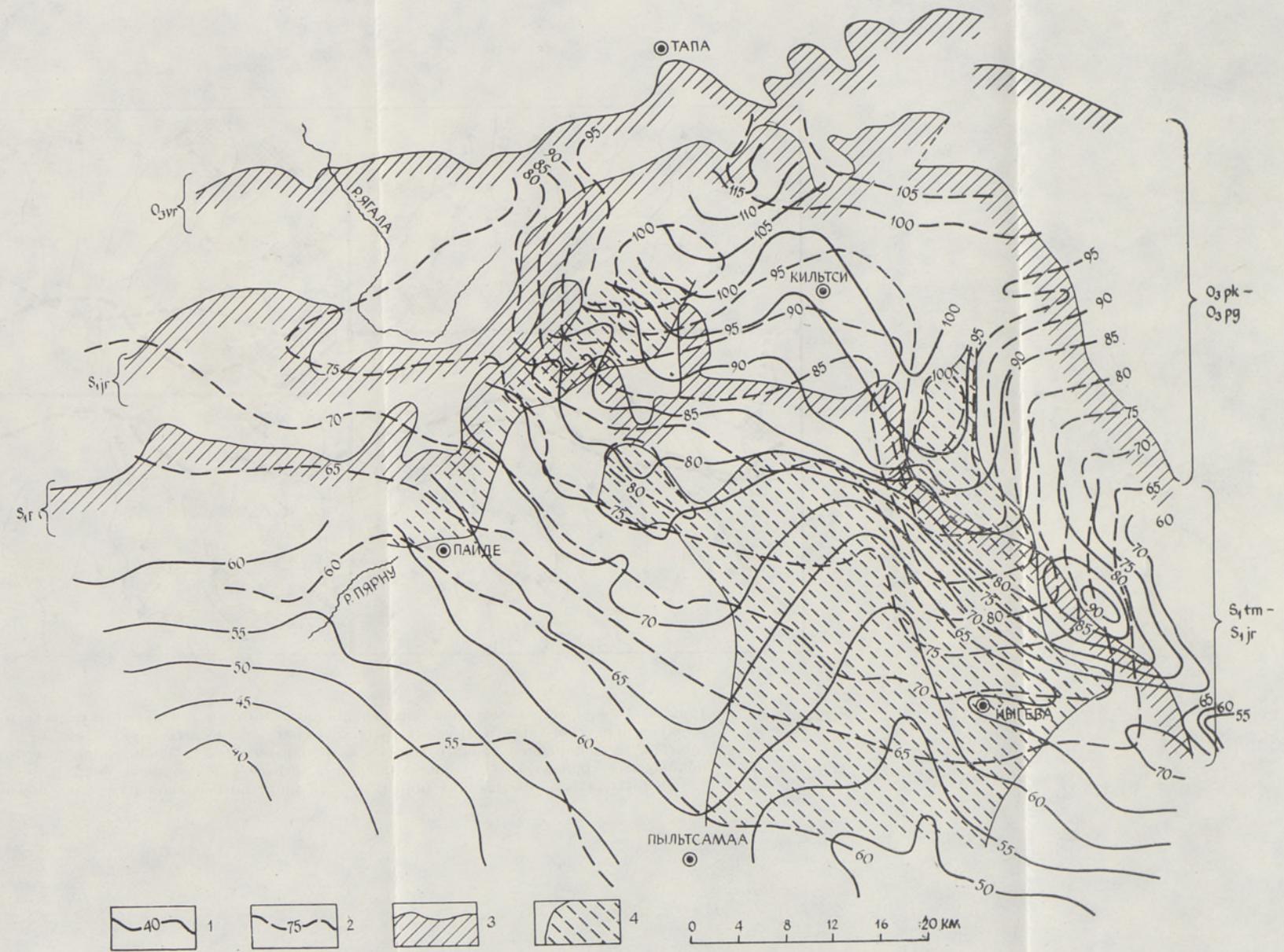


Рис. 3. Элементы гидродинамической обстановки поркуни-пиргуского и тамсалу-юурского водоносных горизонтов. 1 — гидроизоэпезы тамсалу-юурского горизонта, 2 — гидроизоэпезы поркуни-пиргуского водоносного горизонта, 3 — полоса выхода водоупорных пород, 4 — область превышения пьезометрической поверхности нижележащего ( $O_3\text{ pk}-O_3\text{ pg}$ ) водоносного горизонта над пьезометрической поверхностью вышележающего ( $S_1\text{ tm}-S_1\text{ jr}$ ) водоносного горизонта.

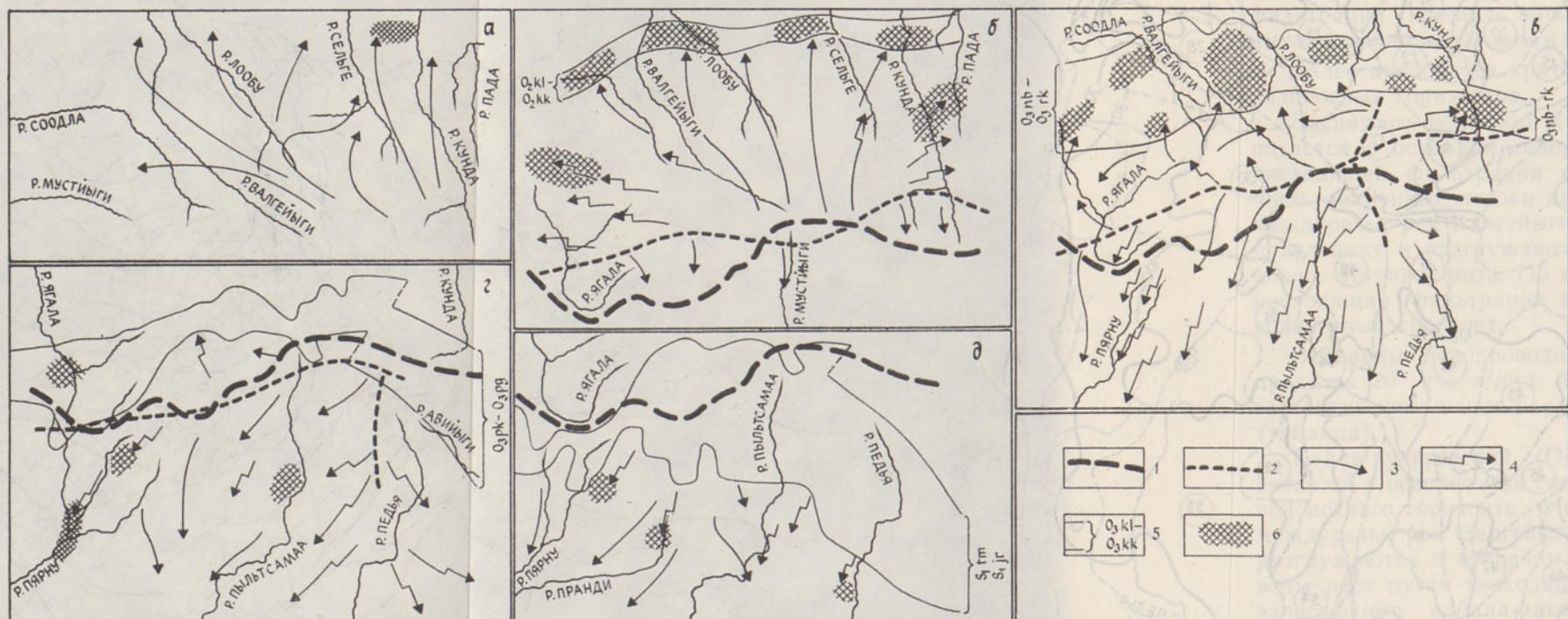


Рис. 4. Основные направления фильтрационных потоков ласнамяги-кундаского (а), кейла-курузеского (б), набала-раквереского (в), поркуни-пиргуского (г) и тамсалу-юурусского (д) водоносных горизонтов. 1 — водораздел I от поверхности земли водоносного горизонта, 2 — водораздел данного водоносного горизонта, 3 — фильтрационные потоки с нисходящей фильтрацией (в низезалегающий водоносный горизонт), 4 — фильтрационные потоки с восходящей фильтрацией (в вышезалегающий водоносный горизонт), 5 — поло-са выхода водовмещающих пород, 6 — область интенсивной разгрузки подземных вод (с высокими модулями подземного стока).

путем площадной восходящей фильтрации и пополняют запасы выше-залегающего водоносного горизонта, причем кое-где разгружаются в речную сеть. Водопроницаемость значительная, преимущественно 100—300 м<sup>2</sup>/сут, нередко до 600 м<sup>2</sup>/сут, коэффициент поперечной фильтрации водоупорных пород вормисского горизонта имеет порядок 10<sup>-4</sup> м/сут. Названный выше водоносный горизонт отделен от тамсалу-юурусского водоносного горизонта (рис. 4д) глинистыми известняками юурусского горизонта, водоупорные свойства которого значительно ниже (порядка 10<sup>-2</sup>—10<sup>-4</sup> м/сут). Названный водоносный горизонт отделен от водовмещающих пород райккюлаского горизонта региональным водоупором, который составляет нижняя часть райккюлаского горизонта (мощностью около 10—15 м) с коэффициентом поперечной фильтрации 10<sup>-3</sup>—10<sup>-4</sup> м/сут.

Тамсалу-юурусский водоносный горизонт распространяется на южном склоне подножья Пандивереской возвышенности, питая путем восходящей фильтрации водовмещающие породы мощного райккюлаского горизонта, воды которого полностью разгружаются также далеко на юге за пределами возвышенности. Водопроницаемость пород данного водоносного горизонта изменяется в пределах 75—375 м<sup>2</sup>/сут, причем наибольшие значения водопроницаемости связаны с тектоническими нарушениями в районе пос. Коэру.

Как уже было сказано, гидрогеологические особенности Пандивереской возвышенности представляют интерес с точки зрения водного баланса. Выпавшая в виде осадков на куполе возвышенности вода разгружается в речной сети далеко за пределами возвышенности, в частности в области Вооремаа и в низинах озер Выртсыярв и Чудского. Таким образом, уточнение водного баланса Пандивереской возвышенности и ее окрестностей является актуальной научной проблемой, имеющей также значительное воднохозяйственное значение.

Представленные в настоящей статье параметры фильтрации водоносных горизонтов и водоупоров могут быть использованы в целях моделирования на последующих этапах исследования.

Нами приведены также уточненные данные о соотношении уровней различных водоносных горизонтов, которые имеют немаловажное значение при проектировании мелиорации влажных земель, распространяющихся на юго-западном, южном и восточном склонах Пандивереской возвышенности. Результаты настоящей работы значительно пополняют представление о напорных водах в процессе переувлажнения земель.

## ЛИТЕРАТУРА

- Валлер Л. К. Методика и результаты расчета подземного питания рек Эстонии. — В кн.: Тр. IV Всесоюз. гидрол. съезда. Л., 1976, 8, 104—114.
- Валлер Л. К. Геогидродинамическая расчлененность и баланс подземных вод Эстонии. — В кн.: Проблемы гидрогеологии Эстонии. Таллин, 1980, 11—121.
- Верте А. И. Особенности формирования подземных вод Эстонской ССР. — Тр. Ин-та геологии АН ЭССР, 1958, II, 93—104.
- Верте А. И. Влияние тектонических структур на пьезометрию и состав подземных вод Эстонии. — Тр. Ин-та геологии АН ЭССР, 1962, X, 337—341.
- Иыгар П. О схеме гидростратиграфического расчленения карбонатных пород Северной Эстонии. — Изв. АН ЭССР. Хим.-Геол., 1977, 26, 155—158.
- Иыгар П., Олли В. О влиянии тектонических нарушений и погребенных долин на гидрогеологические условия Пандивереской возвышенности Эстонской ССР. — Изв. АН ЭССР. Хим.-Геол., 1973, 22, 358—361.
- Кинк Х. Об определении влияния осушения земель на подземные воды. — Сб. науч. тр. ЭСХА, 110. Вопросы мелиорации и водного хозяйства, V. Тарту, 1976, 71—75.
- Перенс Р. О применении расходографии при расчленении гидрогеологического разреза

карбонатной толщи на Пандивереской возвышенности. — Изв. АН ЭССР. Геология, 1978, 27, 130—139.

Эйпре Т. Ф. Водные ресурсы закарстованной Пандивереской возвышенности Эстонии. Л., 1981.

Институт геологии  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
23/IV 1982

P. JÖGAR

### PANDIVERE KÖRGUSTIKU PÕHJAVEEKIHTIDE FILTRATSIOONISKEEMID

Artikkel käsitleb Pandivere kõrgustiku põhjavete toitumist, läbivoolu ja väljavoolu avamusaladel aluspõhja ordoviitsiumi ja siluri kivimite lõikes. On selgitatud põhjaveekihtide vahelise veevahetuse iseloomu ja intensiivsust ning esitatud põhjaveekihtide ja veepidemete veejuhtivusmoodulid kogu Pandivere kõrgustiku kohta.

P. JÖGAR

### GROUND-WATER FLOW MODELS OF PANDIVERE UPLAND (NORTH-EAST ESTONIA)

The bedrock of Pandivere Upland is formed by Ordovician and Silurian limestones with a small dip of layers in the southerly direction. The outcrop lines of stages proceed in the W—E direction. In the watershed part of the Upland karst phenomena occur, and for that reason the precipitation waters infiltrate into the earth, flowing out as ground-water in the marginal areas of the Upland.

The author describes the alimentation, transit and outflow of the ground-water in Pandivere Upland. For studying the direction of the movement of ground-water and aquifers changing, detailed maps of piezometric surfaces of ground-waters were compiled. The overflow from one layer into another is shown in the Table, the results of which have been obtained by a comparison of the maps. The aquifers water exchange has been compared with the modulus of the specific discharge of ground-waters into rivers with the help of correlation analysis, which resulted in stating the significant share of fault zones in the drainage of ground-waters. The modulus of river outflow have served for calculating the permeability modulus of the confining layers. The direction of the movement of ground-water and the aquifers water exchange in the profile of five ground-water layers are illustrated in Fig. 4.